



Universidad Carlos III de Madrid
Escuela Politécnica Superior

INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL: MECÁNICA

PROYECTO FIN DE CARRERA:

**ESTUDIO PARAMÉTRICO DEL PROCESO DE CORTE ORTOGONAL
MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS:**

**ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE CORTE Y
DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN EN LOS RESULTADOS
NUMÉRICOS A ESCALA GLOBAL Y LOCAL.**

Autor: Juan Manuel García de Lomana Moralejo

Tutores: Rachid Cheriguene

M^a Henar Miguélez Garrido

ÍNDICE:	2
1. INTRODUCCIÓN GENERAL AL MECANIZADO	3
2. EL PROCESO DE CORTE ORTOGONAL:	6
a. Tecnología del corte ortogonal: Definición, características y las variables de interés.	6
b. Modelización analítica del corte ortogonal: Modelo de Merchant:	8
c. Acerca de la temperatura y el desgaste en el mecanizado:.....	11
3. INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF):	14
4. MODELIZACIÓN NUMÉRICA DEL PROCESO DE CORTE ORTOGONAL:	17
a. Presentación de la problemática:	17
b. Presentación del modelo numérico de corte ortogonal:	18
c. Metodología utilizada:	20
5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS NUMÉRICOS:	24
a. Resultados globales:.....	24
b. Resultados locales:	28
i. Presentación al procedimiento.....	28
ii. Análisis de presiones y coeficientes de fricción global.....	29
iii. Análisis de velocidades de la viruta.....	35
iv. Análisis de las temperaturas.	37
v. Análisis de las longitudes de contacto.	46
6. CONCLUSIONES	48
7. TRABAJOS FUTUROS.	51
8. ÍNDICE DE FIGURAS	52
9. BIBLIOGRAFÍA	53
10. AGRADECIMIENTOS.	55

1. INTRODUCCIÓN GENERAL AL MECANIZADO:

La principal clasificación de **procesos de conformado** de materiales nos permite distinguir entre: conformado por eliminación de material (**mecanizado por desprendimiento de material**), conformado adhiriendo nuevo material (**moldeo**) y conformado deformando plásticamente nuestra pieza (**mecanizado por deformación**).

En este proyecto nos vamos a centrar en el primer tipo, **mecanizado por desprendimiento de material** y más concretamente en aquellas operaciones referidas a **metales** debido al predominio de este tipo de materiales en la industria actual.

El mecanizado es un proceso de conformado de materiales consistente en la remoción de material, mediante una herramienta de filo, a partir de un bloque de **materia prima** para conseguir determinadas formas y tamaños en una **pieza final**. El material desprendido se hace en forma de **viruta**. El mecanizado es un término muy amplio que hace referencia a muchos procesos de distintas características.

Dependiendo de la naturaleza del filo de nuestra herramienta podemos distinguir entre procesos de **arranque con filos geoméricamente determinados** y procesos de **arranque con filos no determinados**. En el primer tipo de procesos la viruta se genera gracias a la acción de el/los filo/s mientras que en el segundo tipo las virutas se arrancan gracias a la acción de granos abrasivos que no tienen una forma geométrica determinada.

Dentro del mecanizado podríamos establecer otra clasificación que nos permite distinguir entre los trabajos que se realizan **manualmente** (por ejemplo un buril) y los procesos que se realizan mediante **máquinas** que son los predominantes en la industria. En este último tipo, que es el que tratamos en este proyecto tenemos tres elementos que intervendrán en el proceso: **las máquinas herramienta, las herramientas de corte y los elementos de sujeción**.

Las principales familias de mecanizado en función del movimiento relativo entre maquina y pieza y las herramientas utilizadas son las siguientes:

Torneado:

Se obtiene la geometría deseada mediante la combinación de los movimientos de giro de la pieza y desplazamiento de la herramienta de corte. Este tipo de proceso es particularmente eficiente para la obtención de geometrías de revolución.

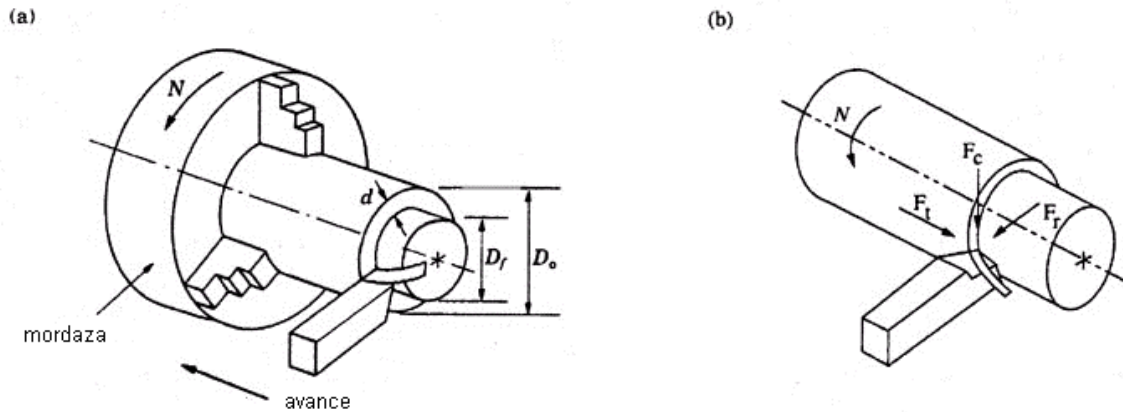


Fig.1: Esquema del proceso de torneado.

Fresado:

Mediante una herramienta que gira y consta de múltiples filos se arranca el material. La pieza generalmente se mantiene fija. Es un proceso de gran versatilidad.

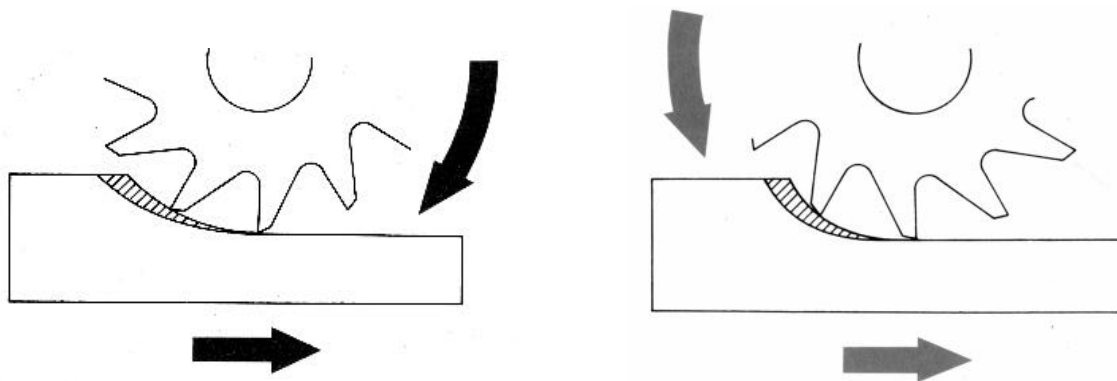


Fig.2: Esquema de fresado en discordancia (izquierda) y en concordancia (derecha).

Taladrado: Es el procedimiento utilizado para la realización de agujeros en las piezas. La pieza permanece fija mientras que la herramienta gira y se desplaza longitudinalmente. Es el proceso de mecanizado más repetido en la industria.

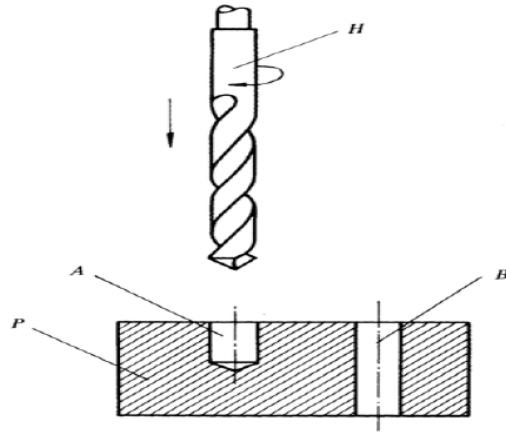


Fig.3: Esquema de taladrado con Broca (arriba) y Pieza (abajo).

Otras clasificaciones del mecanizado y que nos permiten dar una muestra de la variedad de procesos que puede englobar este término hacen referencia: a la escala a la que se realiza el mecanizado, a la temperatura a la que se realiza este, etc...

La importancia del mecanizado reside principalmente en el gigantesco volumen y coste asociado a esta actividad, el cual incluye: coste de las herramientas consumibles, el coste de los trabajadores de la industria, el coste del capital invertido o los costes destinados a la investigación entre otros. El enorme volumen que tienen estos costes en la industria actual, la exigencia de la industria actual y la creciente conciencia de hacer un uso responsable de los recursos nos empujan a conseguir una serie de objetivos:

- Mejorar las herramientas de corte.
- Conseguir mayor precisión en la fabricación de los productos.
- Elevar la producción y variedad de los productos.

En este proyecto intentamos dar un pequeño paso en el conocimiento del proceso utilizando el método de los elementos finitos, siendo conscientes de la amplia variedad y dificultad del avance en esta ciencia y del mucho trabajo que queda aún por hacer.

2. EL PROCESO DE CORTE ORTOGONAL:

2.a. Tecnología del corte ortogonal: Definición, características y las variables de interés.

A pesar de todos los avances científicos hechos a lo largo de estos últimos siglos en el mecanizado de los metales, el estudio de la influencia de las variables que participan en el proceso de corte sigue siendo una tarea de gran interés y sobre la que queda mucho que estudiar.

Los procesos de mecanizado de metales son complejos por la amplia variedad de máquinas con las que se realizan los procesos, por la variedad de geometría/material de las herramientas empleadas, por las propiedades del material de la pieza a mecanizar, por los parámetros de corte tan variados con los que podemos implementar el proceso (profundidad de corte, velocidad, alimentación...) y por la diversidad de elementos de sujeción utilizados. Además debemos ser conscientes de que implican grandes magnitudes de deformaciones, velocidades y temperaturas.

Como primer paso al entendimiento del problema se suele utilizar **el modelo de corte ortogonal**. A lo largo de las siguientes hojas vamos a hacer un breve repaso acerca de la teoría de corte ortogonal, analizando algunos de los parámetros más influyentes. En primer lugar vamos a definir lo que se define como el corte ortogonal.

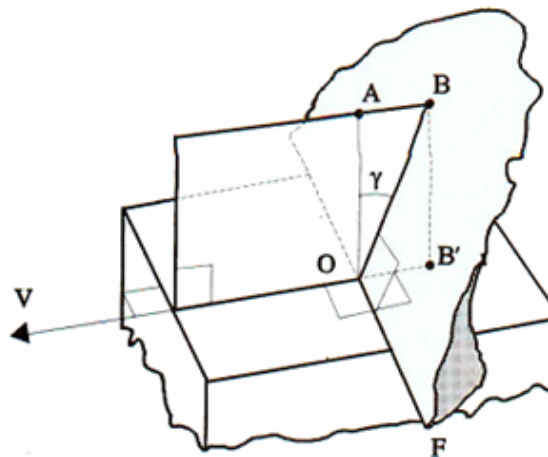


Fig.4: Esquema de un proceso de corte ortogonal

Se trata de un **corte ortogonal** cuando el filo de la herramienta es perpendicular a la velocidad relativa herramienta-pieza. En el modelo ortogonal se produce la misma composición

de fuerzas, sea el plano que fuere paralelo al de la figura por el que se corte el material. Esta suposición es una aproximación razonablemente buena, aunque deberemos ser conscientes de que supone un comportamiento totalmente homogéneo del material y la suposición de un estado de deformaciones planas.

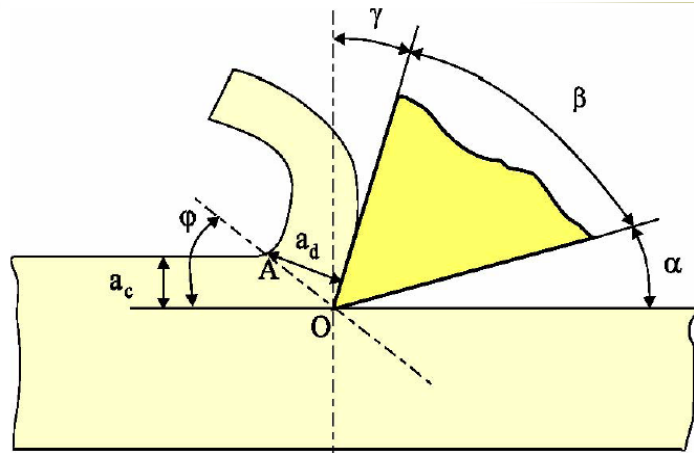


Fig.5: Principales parámetros en el corte ortogonal.

Así pues, gracias al modelo de corte ortogonal podemos simplificar procesos complejos que tienen lugar en tres dimensiones a procesos que tienen lugar en un hipotético plano bidimensional.

La geometría del corte ortogonal viene definida por tres ángulos característicos que son de gran influencia y por la profundidad de la pasada:

Ángulo de desprendimiento (γ):

Es el ángulo formado por la cara de desprendimiento de la herramienta y la dirección perpendicular a la superficie mecanizada. Este ángulo puede tener un sentido positivo si es como en la figura (en sentido horario) o sentido negativo, si es en sentido contrario. Cuanto más positivo es este ángulo menor es el rozamiento entre la viruta y la herramienta. Por el contrario cuanto más negativo es aumenta la robustez de la herramienta.

Ángulo de incidencia (α):

Es el ángulo formado por la cara de incidencia de la herramienta y la superficie de la pieza ya mecanizada. Si el valor del ángulo de incidencia disminuye aumentará el contacto existente entre la herramienta y la pieza, como consecuencia aumentará también la temperatura y disminuirá la

vida de la herramienta. Por el contrario si el valor del ángulo de incidencia aumenta se debilitará el filo de la herramienta.

Ángulo de filo (β):

Es el ángulo formado por las caras de incidencia y desprendimiento de la herramienta.

Espesor de viruta non deformada (a_c):

Es el espesor del material que va a ser eliminado antes de sufrir deformación alguna.

También son de gran importancia los siguientes parámetros:

Ángulo de deslizamiento o cizalladura (ϕ):

Es el ángulo formado por la superficie de la pieza y el plano de deslizamiento. Este un plano teórico en el que se produce la deformación del material de la pieza. En rigor se trata de una zona de deslizamiento más que de un plano propiamente dicho, sin embargo en la práctica es frecuente reducir esta zona estrecha u a un plano.

Espesor de viruta deformada (a_d):

Es el espesor del material eliminado después de haber sufrido la deformación.

Factor de recalcado (z):

Es el cociente entre los espesores de viruta deformada y sin deformar. Es siempre mayor o igual que la unidad.

2.b. Modelización analítica del corte ortogonal: Modelo de Merchant:

En corte ortogonal, con un contacto deslizante entre viruta y herramienta, el modelo de Merchant se basa en la minimización de la energía de corte utilizando el equilibrio de las fuerzas y de los momentos.

El modelo de Merchant supone un equilibrio de fuerzas entre la herramienta y nuestra pieza a mecanizar, es decir la fuerza que ejerce la herramienta sobre la pieza (R') es igual en

magnitud y dirección a la fuerza que ejerce la herramienta sobre la pieza (R) solo que con sentidos opuestos, Fig.6.

$$R = R' \quad (1)$$

La fuerza R puede ser descompuesta según dos sistemas de referencia o criterios distintos:

- Podemos descomponer las fuerzas según los ejes de abscisas y ordenadas en fuerza en la dirección X (F_C) y fuerza en la dirección Y (F_T). F_C es la fuerza en la dirección del corte y F_T es la fuerza de empuje, en dirección perpendicular a la velocidad de corte y a la superficie de trabajo.
- También podemos descomponerlas en otros ejes resultando las fuerzas F que actúa sobre el plano del corte y N que actúa sobre un plano normal al de corte.

En ambos casos la suma de las componentes es igual a R como mostramos en la siguiente figura:

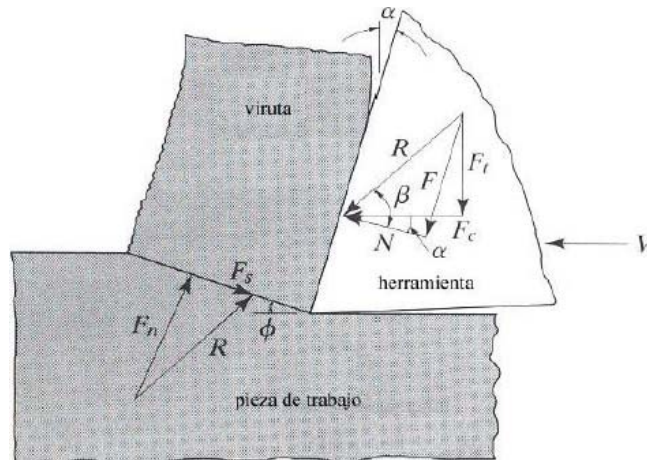


Fig.6: Descomposición de R y R'.

Entonces, es fácil demostrar que las siguientes ecuaciones que resultan de descomponer R:

$$F = R * \text{sen } \beta \quad (2)$$

$$N = R * \text{cos } \beta \quad (3)$$

Donde F es una fuerza de fricción en la interfase entre la herramienta y la viruta, N es una fuerza normal perpendicular a esta interfase y β es el ángulo existente entre R y N.

Las fuerzas F y N también pueden ser descompuestas de la siguiente forma:

$$F = F_C * \sin \alpha + F_T * \cos \alpha \quad (4)$$

$$N = F_C * \cos \alpha - F_T * \sin \alpha \quad (5)$$

Siendo α el ángulo de desprendimiento.

Si descomponemos R' nos queda que:

$$F_S = F_T * \cos \Phi + F_C * \sin \Phi \quad (6)$$

$$F_N = F_C * \sin \Phi + F_T * \cos \Phi \quad (7)$$

Donde Φ es el ángulo de cizalladura.

A continuación podemos ver las distintas descomposiciones de las fuerzas en el denominado círculo de Merchant:

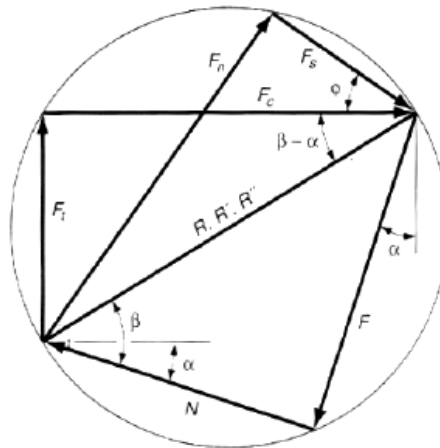


Fig.7: Círculo de Merchant.

Llegados a este punto podemos calcular cual es el coeficiente de fricción global (μ_{global}) que actúa entre la viruta y la herramienta sin mas que dividir cada fuerza tangencial (F) entre su correspondiente normal (N).

$$\mu_{\text{global}} = F / N = \tan \beta \quad (8)$$

En un proceso de mecanizado convencional los coeficientes de fricción medidos suelen ser altísimos en comparación con los valores de fricción medidos en contacto convencional, por ejemplo 0.2 para el tipo de contacto en seco acero-acero.

Con respecto a la cinemática del corte, podemos el modelo de Merchant considera tres velocidades importantes, Fig.8, que son:

- V: Velocidad de corte: relativa entre herramienta y la pieza, debida al movimiento de corte.
- V_s : Velocidad de deslizamiento de la viruta respecto pieza
- V_c : Velocidad de deslizamiento de la viruta respecto herramienta.

Estas tres velocidades se pueden relacionar por la siguiente ecuación:

$$\frac{v_s}{\cos \gamma} = \frac{v_c}{\sin \phi} = \frac{v}{\cos(\phi - \gamma)} \quad (9)$$

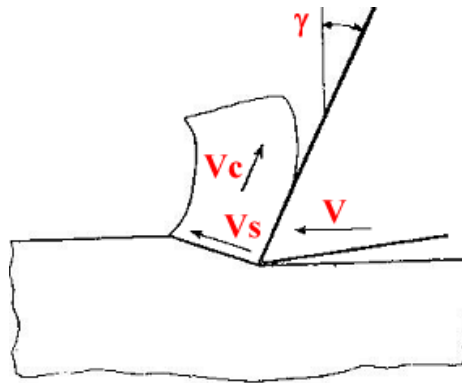


Fig.8: Cinemática del corte ortogonal.

2.c. Acerca de la temperatura y el desgaste en el mecanizado:

Después de las fuerzas posiblemente el parámetro de mayor importancia en el mecanizado es **la temperatura**. La temperatura alcanzada en las operaciones de mecanizado es un parámetro crítico para la vida útil de la herramienta, la calidad de las superficies mecanizadas y en las propiedades mecánicas del material resultante. Las temperaturas que se alcanzan en el mecanizado se han medido experimentalmente de distintas formas: Uso de termopares empotrados, técnicas de radiación infrarroja, medición de las variaciones de micro estructura y micro dureza, uso de pinturas termo sensibles, etc...

Las energías de deformación y de fricción en los procesos de corte se disipan en forma de **calor** que contribuye al aumento de la temperatura en la zona de corte. Se producirán mayores

temperaturas cuanto más duro sea el material a mecanizar, y mayores la profundidad de pasada y la velocidad. Según la teoría este será generado en las siguientes proporciones en las siguientes proporciones.

- Un 80% del calor será generado en la zona primaria.
- Un 18% del calor generado será debido a la fricción entre la pieza y la herramienta
- El 2% restante del calor generado se produce por el rozamiento de la punta del corte sobre la superficie de la pieza.

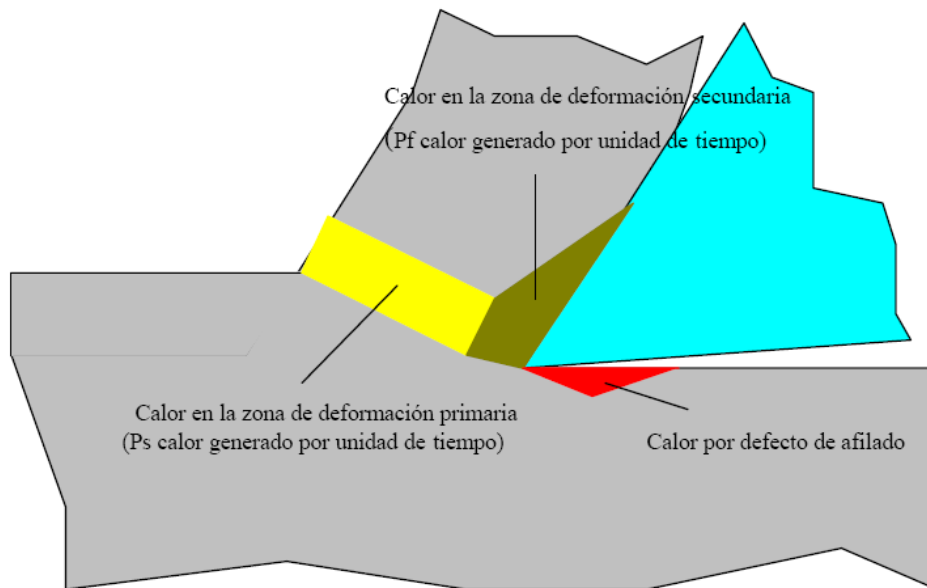


Fig.9: Esquema de zonas primaria, secundaria y terciaria.

El análisis del calor nos lleva a definir las siguientes zonas:

Zona primaria:

En esta zona es donde va a tener especial importancia la deformación plástica. El calor aquí generado, es principalmente debido a la deformación plástica que tiene lugar.

Zona secundaria:

Es la zona de contacto herramienta-pieza: En esta zona paralela a la cara de la herramienta es donde se va a producir principalmente el fenómeno de la fricción. Nos interesará reducir en la medida de lo posible esta fricción. Para ello se pueden tomar las siguientes medidas: mejorar el acabado de la herramienta y del filo; utilizar herramientas y piezas con poco rozamiento, aumentar la velocidad de corte, aumentar el ángulo de desprendimiento o utilizar un

fluido de corte. Reducir la fricción tendrá como consecuencia un aumento del ángulo de cizalladura y una reducción del grosor de la viruta generada. También acarreará la consecuente reducción de temperaturas.

Zona terciaria:

Es la zona de la superficie mecanizada.

La duración de la herramienta es el tiempo de corte requerido para alcanzar ‘el criterio de duración de la herramienta’. El **desgaste de la herramienta** puede ser fundamentalmente de dos tipos: **progresivo** o **prematureo**.

El tipo de **desgaste prematuro** ocurre de forma repentina de tal forma que no se puede prevenir. La causa de este tipo de fallo suele estar relacionada con una sobre carga de las fuerzas de corte sobre la herramienta, en particular en el entorno de la punta de la punta de la herramienta, provocando una rotura mecánica de una parte de esta herramienta.

Los tres tipos de **desgaste progresivo** son los siguientes:

La difusión: tiene lugar cuando se produce un intercambio de átomos entre la viruta y la herramienta que ocasiona la pérdida de aquellos que le confieren dureza.

La abrasión: se produce cuando partículas más duras que la herramienta entran en contacto con esta rayándola y produciendo que se pierda.

La adhesión: tiene lugar cuando viruta y herramienta entran en contacto a alta presión y temperatura originando un soldado entre ellos, que hace que a medida que la viruta fluye se desprendan pequeñas partículas de la herramienta.

Por último en cuanto a la localización del desgaste de la herramienta, podemos diferenciar los siguientes dos tipos:

- **Desgaste de cara:** por acción de la viruta sobre la superficie de desprendimiento.
- **Desgaste en el flanco:** rozamiento con la superficie generada en la pieza sobre la superficie de incidencia.

3. INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF):

EL Método de Elementos Finitos es una herramienta matemática que pretende la resolución de problemas continuos mediante la transformación de estos en problemas discretos.

Para ello se divide sólido continuo en un número finito de partes (Elementos) cuyo comportamiento viene definido por un número finito de parámetros asociados a cada nodo, que son los puntos de unión (Nodos) de cada elemento y sus adyacentes. La solución al sistema se realiza de forma discreta, haciéndose posteriormente un ensamblaje de los elementos.

El MEF conlleva la resolución simultanea de un número muy grande de ecuaciones, por lo que su utilización no fue viable hasta que los ordenadores digitales y el software adecuado no estuvieron disponibles hacia 1960. En un mundo como el de nuestros días en el que los ordenadores y sus aplicaciones tienen un papel imprescindible aplicándose a todos los sectores y las aplicaciones imaginables, el MEF se hace imprescindible para resolver multitud de problemas ingenieriles de varios tipos: estructurales, térmicos, de dinámica de fluidos, magnéticos... Todo tipo de problemas que matemáticamente pueda ser descrito mediante ecuaciones diferenciales en derivadas parciales.

Un problema real es de tipo continuo y tiene infinitos grados de libertad. Con el MEF lo que se hace es reducir nuestro problema a un número finito de grados de libertad, dividiendo (mallando) la pieza en un número determinado de elementos. Si dividimos la pieza en un número muy grande de elementos, obtendremos unos resultados muy precisos, pero el problema será más complicado de resolver (más memoria y más tiempo de cálculo para el ordenador). Si la dividimos en unos pocos elementos, el cálculo será muy rápido, pero los resultados no serán muy fiables porque el sistema de ecuaciones que se plantea se aleja mucho de la realidad. Es por esto por lo que se utilizan mallas que tienen distintas regiones en las cuales el tamaño de nuestros elementos variará en función de la necesidad de precisión que necesitemos en cada zona.

En el mercado existe actualmente una amplia gama de programas informáticos que aplican el MEF a la resolución de diversos problemas de ingeniería, Este tipo de software consta de tres módulos que funcionan de la siguiente forma:

Pre-procesador:

- Construcción o importación geométrica de la pieza.
- Discretización de la pieza (Mallado).
- Definición de las características del material.
- Ligaduras de la pieza.
- Aplicación de solicitaciones.

Procesador:

Es el módulo encargado de la construcción y resolución de las ecuaciones del modelo matemático construido en el pre-procesador.

Post-procesador:

Permite la interpretación y manipulación de los resultados obtenidos en el procesador con el fin de determinar la validez del diseño y del método de elementos finitos.

La utilización de este tipo de tecnologías supone siempre un valor añadido, ya que para todas sus aplicaciones se detectan y eliminan los posibles problemas que pueden tener los productos o procesos a utilizar sin la necesidad de prototipos o pruebas reales. De esta forma se reducen costes, existe la posibilidad de corregir errores en la fase de diseño, se obtienen productos de mayor calidad y precisión,

En este proyecto se implementa el MEF mediante el programa Abaqus/Explicit para la simulación de procesos de corte ortogonal en seco y en dos dimensiones, con el fin de analizar la respuesta de los resultados a la variación de ciertos parámetros de corte sin tener que recurrir a los ensayos experimentales.

Abaqus es un software usado con frecuencia en los ámbitos industriales y de la investigación para simular el comportamiento de estructuras y cuerpos sólidos a cargas mecánicas dinámicas u estáticas y/o térmicas, a veces con problemas de contacto. Estos programas han sido desarrollados para el diseño avanzado.

Existen distintos modelos de caracterización de las mallas para abordar mediante el MEF los problemas de procesos de mecanizados como el que vamos a estudiar:

- Se habla de cálculos puramente **Lagrangianos** cuando la malla obtenida por discretización se mueve por convección debido al movimiento del fluido. En consecuencia, el dominio de cálculo y la región de líquido se mueven idénticamente durante todo el tiempo. Se producen grandes distorsiones en la malla y se requiere una técnica de remallado capaz de corregir la distorsión. Con este remallado de alguna manera se pierde el carácter puramente Lagrangiano. el punto de vista Lagrangiano es utilizado en el estudio de los sólidos

- En los cálculos puramente **Eulerianos**, la malla permanece fija. En este caso no se requieren técnicas de remallado costosas y en la ecuación de cantidad de movimiento se mantiene el término convectivo.

- Entre los dos extremos anteriores existen otros métodos llamados ***Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE)*** en los que la malla se mueve con el fluido hasta un punto intermedio entre la no advección (carácter puramente Lagrangiano) y advección pura (carácter puramente Euleriano).

4. MODELIZACIÓN NUMÉRICA DEL PROCESO DE CORTE ORTOGONAL:

4.a. Presentación de la problemática:

El objeto de este proyecto es la utilización de una herramienta de MEF para el análisis de los procesos de mecanizado de cizalladura ortogonales. Mediante el MEF aplicado al mecanizado se pretende lograr un conocimiento mayor del proceso, que ayude en la correcta definición de los parámetros de corte y en la mejora del diseño de las herramientas.

Se llevó un estudio paramétrico en Abaqus/Explicit variando nuestras variables de entrada o **input**:

- **Coefficientes de fricción** implementados (μ) distintos: 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, y 1.
- **Velocidades de corte** (V) diferentes: 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 m/s.

Mientras que el coeficiente de fricción es una variable que depende de los materiales de pieza y herramienta, la velocidad es una variable cuyo valor se puede escoger dentro de los rangos en que funcione la máquina con la que trabajemos. La elección de su valor no es algo arbitrario, sino que debe elegirse escogiendo un punto óptimo entre bajas velocidades que dan lugar a tiempos de mecanizado muy altos, y las altas velocidades que ocasionan temperaturas excesivamente altas y como consecuencia el desgaste de la herramienta.

Se pretende ver la influencia que tienen estos dos parámetros de entrada sobre una serie de variables de salida u **output**, entre las que diferenciamos:

- **Variables globales o de escala macroscópica:**
 - Fuerzas de corte F_C y F_T .
 - Fuerzas F y N según la descomposición ilustrada en Fig.6 (Relaciones Eq.4 y Eq.5).
 - μ_{GLOBAL} , como cociente entre la tangencial (F) y la normal (N).
- **Variables locales o de escala microscópica** (a lo largo de la interfase entre herramienta y viruta):

- Las presiones locales.
- Las velocidades con las que fluye el material en la viruta.
- Los coeficientes de fricción local.
- Las temperaturas.
- Las longitudes de contacto.

4.b. Presentación del modelo numérico de corte ortogonal:

En primer lugar vamos a mostrar la geometría de la pieza y la herramienta:

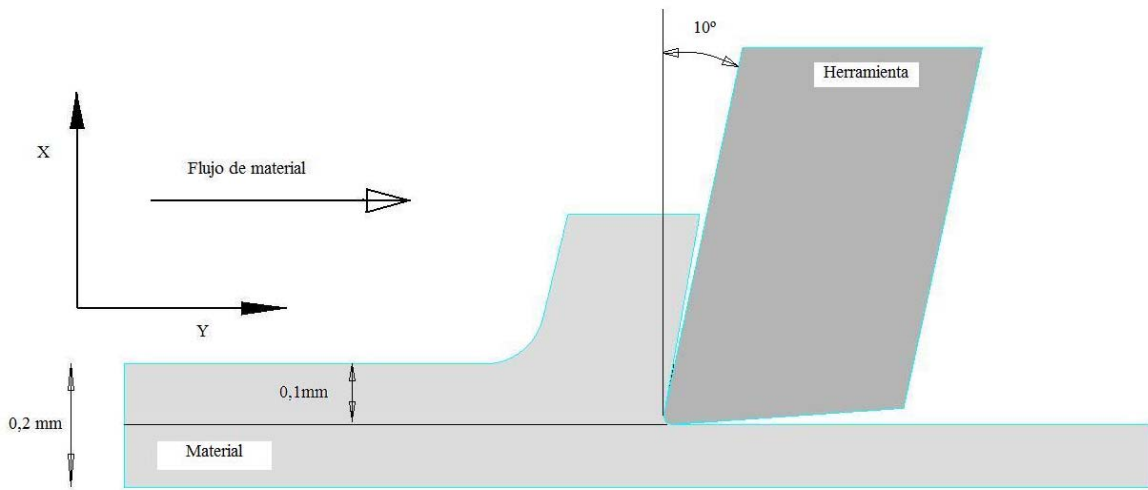


Fig.10: Geometría del modelo.

Como podemos observar tenemos un proceso de corte sobre un bloque de material de 0.2 mm de altura con una profundidad de pasada de 0,1mm.

Nuestra pieza es un material **isótropo, homogéneo, incompresible**, un acero con alta maquinabilidad 42CrMo4, parecido al AISI4041.

Nuestra herramienta es un carburo típico con un elevado módulo de elasticidad y que solo sufre deformaciones elásticas. El radio del filo es de 15 micrómetros y ángulos característicos de la herramienta son los siguientes: ángulo de desprendimiento, $\gamma = 10^\circ$; ángulo de filo, $\beta = 76^\circ$; ángulo de incidencia, $\alpha = 4^\circ$.

La viruta generada en el proceso es continua.

Respecto a las condiciones de contorno tenemos una herramienta que se encuentra empotrada y un material que fluye hacia en la dirección X a una velocidad constante.

El comportamiento del material a partir del que hemos obtenido los resultados ha sido modelado mediante la ecuación de Johnson Cook, disponible en Abaqus/Explicit y cuya expresión presentamos a continuación:

$$\sigma = \left(A + B \varepsilon^n \right) \left(1 + C \cdot \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) \left(1 - \left(\frac{T - T_0}{T_{melt} - T_0} \right)^m \right) \quad (\text{Eq.1})$$

Siendo σ la tensión (MPa), ε_p la deformación plástica efectiva, $\dot{\varepsilon}$ la velocidad de deformación plástica efectiva y T la temperatura.

Las constantes propias del material son:

A = 612 MPa.

B = 436 MPa.

C = 0.008

n = 0.15

m = 1.46

$\dot{\varepsilon}_0 = 0.000577 \text{ s}^{-1}$.

$T_{melt} = 1793 \text{ }^\circ\text{K}$.

$T_0 = 293^\circ\text{C}$.

Inicialmente tenemos tanto el material como la herramienta a una temperatura uniforme de 293°C ($T_0 = 293^\circ\text{C}$). El proceso se realiza en seco, es decir en ausencia de líquidos lubricantes.

En cuanto al mallado mostramos la siguiente representación:

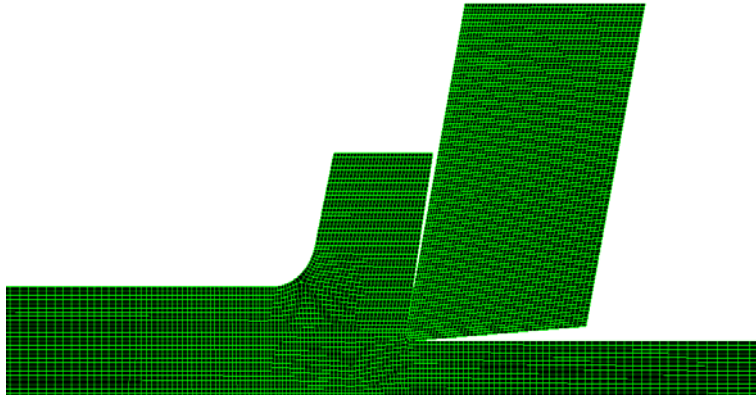


Fig.11: Mallado del modelo.

El tipo de elemento utilizado para el mallado ha sido un CPE4RT:

C : Cuadrado.

PE : Supone una deformación plana.

4 : Tiene cuatro nodos

R : Tiene una interpolación en el centro del elemento

T : Utiliza la temperatura como variable

Su talla es de alrededor de unos $8 \mu m$.

4.c. Metodología utilizada:

El análisis realizado ha implicado el manejo de grandes volúmenes de información, así como la realización del mismo proceso multitud de veces. Esto ha exigido ser muy metódico en el trabajo.

El primer paso ha consistido en modelar los distintos tipos de viruta necesarios para las simulaciones mediante la herramienta de CAD que contiene ABAQUS.

Una vez realizado esto se han elaborado cada uno de los INP. Estos INP son los programas necesarios para que ABAQUS pueda lanzar la simulación. Contienen toda la información referente a los datos del modelo y de la historia. Los datos del modelo definen el modelo de elementos finitos: nodos, elementos, propiedades de los elementos, definición del

material y cualquier dato que especifica el modelo por si mismo. Los datos de la historia definen lo que le pasa al modelo, la secuencia de los eventos a los que el modelo está sujeto.

La elaboración de los INP se ha hecho *partiendo de cuatro tipos básicos de INP (uno para cada viruta)* en los que hemos ido cambiando sistemáticamente:

- El valor del coeficiente de fricción.
- El valor de la velocidad del mecanizado.
- El valor del tiempo de cálculo.
- El número de intervalos del cálculo (Esto nos da la medida de la frecuencia o periodo que cogemos para tomar datos de nuestra simulación. Igual a 20).
- La frecuencia de grabación de los resultados en el ODB (Igual a 200).

Especialmente importante es en este punto definir el tiempo de cálculo necesario para cada simulación, puesto que para obtener unos datos congruentes hemos de asegurarnos que hemos dado el tiempo necesario a la simulación para garantizar una estacionalidad de los resultados desde el punto de vista de las fuerzas. El cálculo de cada una de las simulaciones por parte de Abaqus es un proceso computacionalmente muy complejo y que requiere de bastante tiempo para su finalización. Es por ello que el establecimiento del tiempo de simulación hay que tomarlo como una decisión crítica ya que si le damos demasiado tiempo puede estar varios días para finalizar cada una de nuestras 40 simulaciones y si le damos demasiado poco tiempo los datos que se extraigan no corresponderían a un estado estacionario, si no que serán muy dependientes del tiempo, con lo cual los datos no tendrán ningún valor.

Se han utilizado tiempos para todas las simulaciones del orden de los milisegundos, teniendo en cuenta que como norma general, cuanto mayor es la velocidad a la que se lleva a cabo el mecanizado, menor será el tiempo necesario para que en la simulación se alcance un estado estacionario. Multiplicando el tiempo de la simulación por la velocidad de corte implementada podríamos obtener la longitud de material cizallado.

Como ejemplo de todo esta problemática de la estacionalidad de los datos mostramos dos gráficas en la que representan las fuerzas en las direcciones X e Y (F_C y F_T) en el contacto herramienta-pieza para dos simulaciones distintas.

Cada una de ellas es representativa de los dos casos que nos hemos encontrado, Fig.11: un caso en el que las fuerzas llegan a un estado estacionario y permanecen constantes ($\mu= 0.2$ y $V= 4$ m/s) y otro en el que al llegar al estado estacionario observamos que la fuerzas siguen unos ciclos muy bien definidos ($\mu= 1$ y $V= 4$ m/s). Las vemos a continuación:

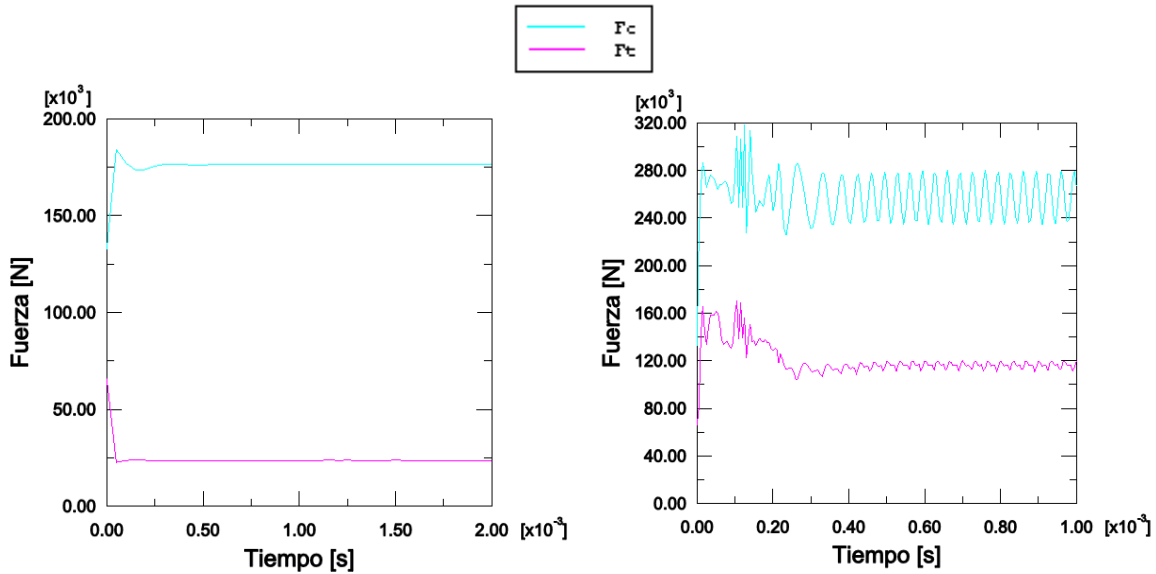


Fig.12: Tipologías de estacionalidad de las fuerzas.

En la gráfica de la izquierda vemos que la estacionalidad se alcanza rápidamente y las fuerzas toman un valor constante, mientras que en la de la derecha se tarda más en alcanzar el estado estacionario y cuando se alcanza, las fuerzas describen unos ciclos bastante claros, que achacaremos de momento a las vibraciones entre la herramienta y la pieza. Para este tipo de gráficas las fuerzas que hemos tomado como estacionarias se corresponden con la fuerza media de los extremos de cada intervalo.

A continuación vamos a analizar el problema de la estacionalidad de los datos desde el punto de vista de otra variable: la temperatura. Se muestran a continuación, en la Fig.12, como van cambiando los campos de temperaturas en la herramienta y la pieza a lo largo del tiempo de simulación, desde el momento inicial, pasando por los instantes de cálculo correspondientes a 0.25; 0,50; 0,1; 0,15; y 2 ms respectivamente.

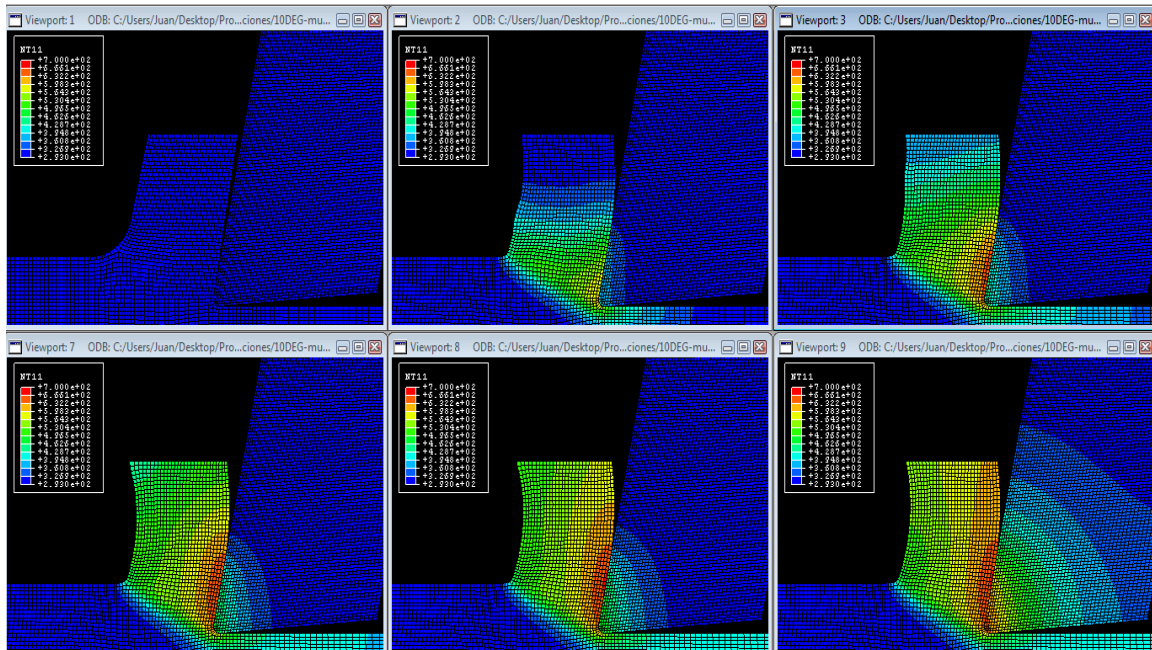


Fig.13: Campos de temperaturas en $t=0$; 0,25; 0,50; 0,1; 0,15; y 2 ms (de izq a der y de arriba abajo)

Se puede apreciar como a partir del 4º instante de cálculo la forma de la viruta permanece estable y también como del 5º al instante final de cálculo los campos de temperatura en la viruta no cambian tan bruscamente. A partir del instante final en adelante los campos de temperatura de la viruta permanecen estables.

Todos los resultados presentados en este trabajo han sido medidos después de haber alcanzado ambas estacionalidades: la mecánica y la térmica.

5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS NUMÉRICOS:

5.a. Resultados globales:

Hemos empezado por analizar como son las fuerzas que ejerce la herramienta sobre la viruta o la viruta sobre la herramienta, que según hemos visto en la parte teórica de este proyecto, son iguales (véase sección 2.b sobre el modelo de Merchant). El análisis de las fuerzas es de gran importancia ya que nos no solo conocer las sollicitaciones dinámicas a que se ve sometida la herramienta o la pieza sino también nos permitirá evaluar cual es la potencia requerida para realizar el proceso de corte.

A continuación mostramos las fuerzas en la dirección X y en la dirección Y (F_c y F_t según la nomenclatura utilizada en la parte teórica), que nos ha dado Abaqus para cada una de las simulaciones (a una $\mu_{implementada}$ y a una v específicas) una vez alcanzado el estado estacionario.

Los resultados son los siguientes:

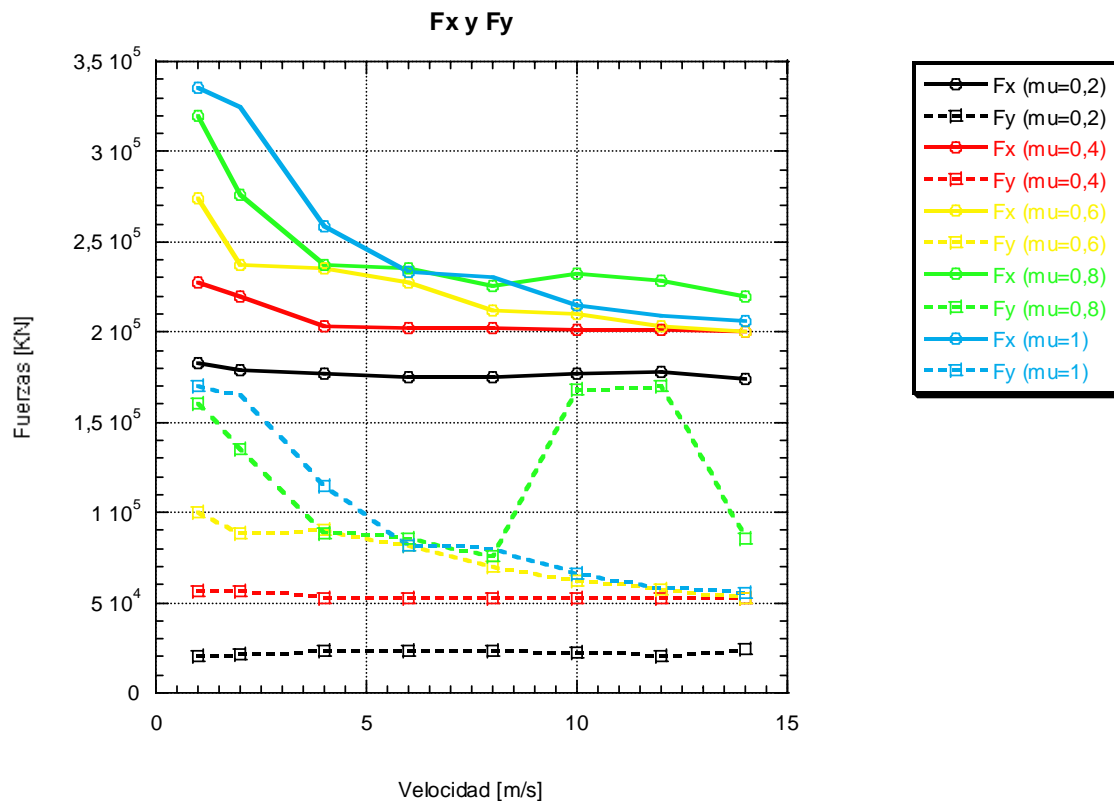


Fig.14: Fuerzas en la dirección X e Y.

En esta primera gráfica podemos observar como cuanto mayor es el coeficiente de fricción, mayores son las fuerzas (tanto la componente en la dirección X como la componente en la dirección Y).

También se puede comprobar como a medida que aumentamos la velocidad del mecanizado para un coeficiente de fricción dado, las fuerzas van disminuyendo.

Otro hecho significativo es que las series que representan a las fuerzas con rozamiento bajo ($\mu = 0.2$ y $\mu = 0.4$) tenemos un comportamiento constante, con una ligera bajada hasta 4m/s, mientras que para el resto de las series la disminución de las fuerzas es mucho mayor.

Obviamente para las simulaciones de $\mu = 0.8$ a velocidades altas ($V \geq 10 \text{ m/s}$) hemos obtenido un comportamiento algo anómalo, ya que no se sigue la tendencia, puesto que F_X y F_Y son mayores que para $\mu = 1$.

Una vez obtenidos los valores que hemos considerado estacionarios para las fuerzas en la dirección X e Y, hemos utilizado las relaciones trigonométricas que mostrábamos en el apartado 2.2, para obtener las componentes normales y tangenciales de las fuerzas previamente calculadas.

Particularizando para nuestro caso en el que ángulo de desprendimiento es igual a 10° ($\alpha = 10^\circ$), podemos obtener las fuerzas F y N. Los mostramos para mayor claridad en dos gráficas separadas, ya que para algunas series las normales y las tangenciales se cruzan.

Los resultados son los que siguen:

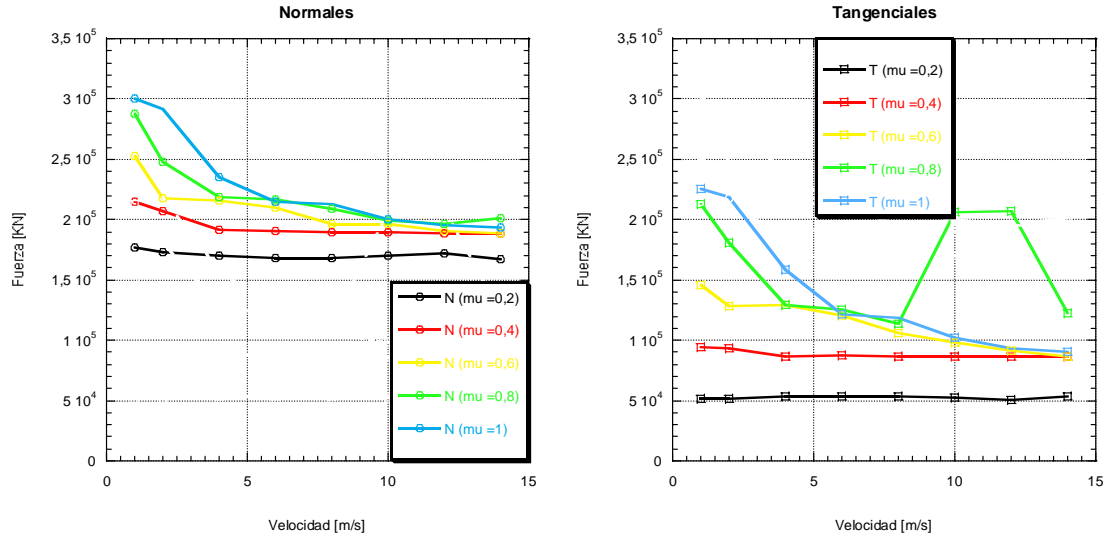


Fig. 15: Fuerzas normales (izq.) y tangenciales (der.).

Para las fuerzas tangenciales y normales ocurre algo muy parecido a lo que pasa con las fuerzas en la dirección X e Y. Por una parte a mayor coeficiente de fricción tanto las tangenciales como las normales son mayores y por otra parte a medida que aumentamos esta velocidad para una fricción dada, tanto una como la otra bajan. De igual forma y consecuencia de los resultados anómalos que hemos obtenido en el primer punto obtenemos desviaciones en la tendencia para las simulaciones de $\mu = 0.8$ a velocidades altas ($V \geq 10$ 10 m/s).

Una vez obtenidos los datos relativos a las fuerzas normales (N) y tangenciales (F) de cada simulación podemos dar un paso más y calcular el coeficiente de fricción global que existe entre la pieza y la herramienta viene definido con la siguiente relación:

$$\mu_{\text{global}} = F / N \quad (8)$$

Este proceso lo hemos repetido para cada una de las simulaciones que hemos realizado en Abaqus: con distintas velocidades (1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, y 14 m/s) y con distintos coeficientes de fricción (0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1 y 1.2), obteniendo los distintos resultados mostramos a continuación:

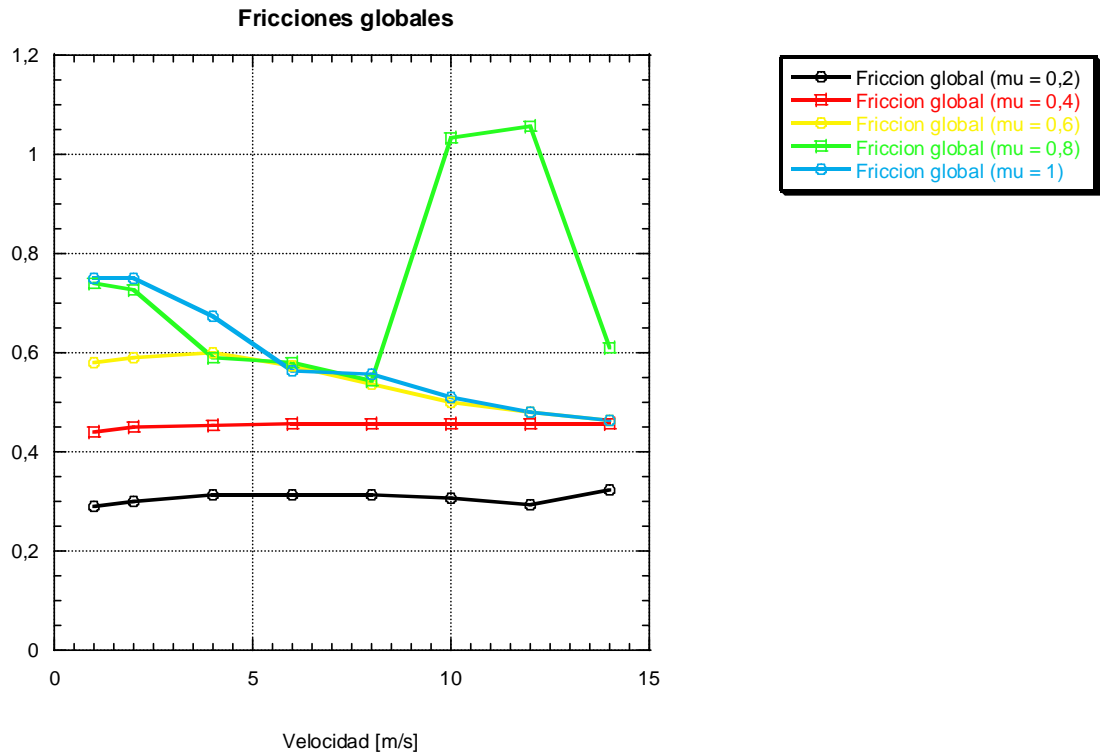


Fig. 16: Coeficientes de fricción global

En cuanto a los resultados del coeficiente de fricción global que podemos ver en esta gráfica, podemos ver dos tendencias distintas, igual que en las anteriores gráficas.

Por una parte para coeficientes de fricción bajos ($\mu = 0.2$ y $\mu = 0.4$) observamos como el coeficiente de fricción global se mantiene constante con la velocidad en valores un poco más elevados que los coeficientes de fricción implementados. De esto se deduce que para estos coeficientes de fricción el aumento de la temperatura ocasionado por un mayor velocidad de corte no ocasiona que el coeficiente de fricción global baje.

Sin embargo para el resto de los coeficientes de fricción implementados se observan bruscas bajadas del coeficiente de fricción global cuando aumentamos la velocidad (y por tanto la temperatura).

También fruto de los resultados anómalos o erróneos que hemos obtenido en las fuerzas globales en la dirección X e Y y que se han trasladado al cálculo de normales y tangenciales

obtenemos datos que no siguen la tendencia en las simulaciones de $\mu = 0.8$ a velocidades altas ($V \geq 10 \text{ m/s}$).

Del análisis global de las fuerzas y de los valores de las fricciones globales obtenidos se observa una circunstancia que parece chocante. A medida que aumentamos las velocidades del mecanizado vemos que la tendencia del μ_{Global} se asemeja en todos los casos. ¿Pero como es posible que esto ocurra? Es decir, si hemos realizado las simulaciones implementando por ejemplo coeficientes de fricción locales de 1 ¿como es posible que a grandes velocidades (12 y 14) los valores del coeficiente de fricción global bajen tanto?

La respuesta tiene que ver con el efecto de la temperatura, que en estos casos hace que el material se reblandezca y que fluya, y tenga un comportamiento distinto que el que tiene a menores temperaturas. Para demostrar esto nos apoyaremos en los resultados que vamos a obtener en el estudio local referente a las temperaturas.

5.b. Análisis local:

5.b.i. Presentación al procedimiento.

Para el análisis local en vez de sacar un único valor para cada una de las magnitudes a estudiar en cada simulación como hacíamos en el análisis global, vamos a analizar la evaluación de cada una de las magnitudes a lo largo de un recorrido, dado por la distancia de contacto. Hemos creado por tanto una serie de paths (compuestos por un gran número de elementos) que recorren la zona de contacto entre la pieza y la herramienta, desde el contacto en la zona de curvatura del filo de la herramienta (punto A) hasta la zona superior del contacto (punto B) como mostramos en el siguiente dibujo:

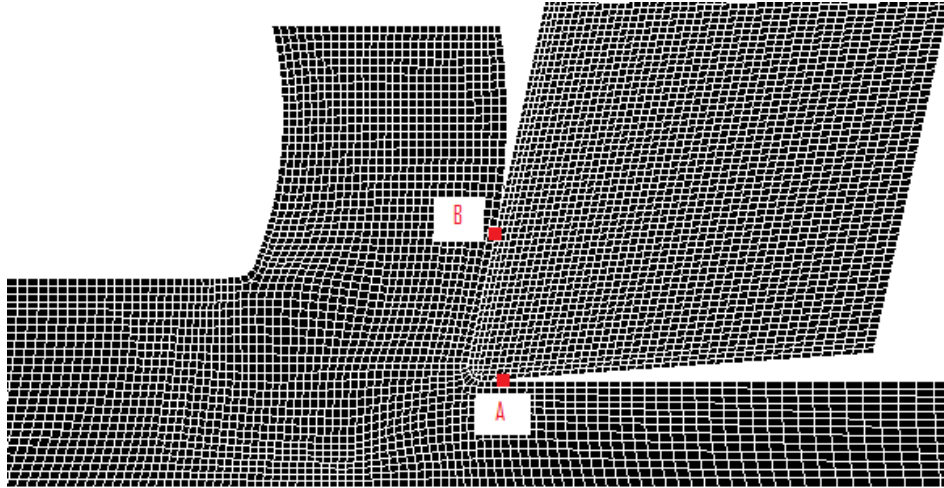


Fig. 17: Puntos de inicio y fin de la interfase viruta herramienta (A y B).

Es precisamente en cada uno de estos elementos sometidos a contacto con la herramienta donde hemos evaluado las distintas variables a analizar. Nos interesa ver como es la evolución de las distintas variables en interfase desde A hasta B. El instante de cálculo elegido para hacer el análisis ha sido como siempre el último de cada una de las simulaciones considerado como cuasi-estacionario.

Las variables que vamos a analizar han sido las presiones, las fricciones locales, las velocidades, las temperaturas y las longitudes de contacto. La variable independiente que hemos utilizado para mostrar la evolución de estas variables es la proyección sobre el eje Y de la longitud de contacto normalizada. Sin embargo para la representación de las presiones la variable independiente que hemos utilizado es la proyección vertical (sobre el eje Y) de la distancia de contacto.

5.b.ii. Análisis de presiones del contacto y coeficientes de fricción local:

En primer lugar vamos a hacer un análisis de las presiones que actúan en la zona del contacto herramienta-pieza a lo largo de él, desde el punto en que se inicia este en la zona inferior cerca del radio de la herramienta, en el punto, hasta el punto B, en la zona superior.

En lugar de normalizar la distancia vertical (proyección del contacto entre viruta y herramienta), en el caso de las presiones hemos utilizado esta distancia directamente como variable del eje de abscisas.

Esto nos permitirá observar como para cada una de las fricciones implementadas, cada serie (representativa de cada una de las velocidades) alcanza el valor cero de presión en el mismo momento para sus dos componentes (normal y tangencial).

También podemos ver como para cada simulación las distintas duplas de componentes alcanzan este valor cero en puntos distintos, es decir que cada distinta velocidad tendremos una longitud de contacto diferente.

Una vez obtenidas las gráficas de presiones, operando como en el caso del análisis global hemos obtenido la variación del coeficiente de fricción local para cada uno de esos puntos a lo largo del contacto herramienta-pieza, mediante la siguiente ecuación:

$$\mu_{\text{local}} = F_{\text{local}} / N_{\text{local}} \quad (9)$$

La Fricción local la hemos representado en función de la proyección vertical de la longitud de contacto normalizada.

Vamos a ir representando cada gráfica de presiones de contacto (para cada $\mu_{\text{implementado}}$), con su respectiva gráfica de fricciones locales en dos grupos distintos en cada uno de los cuales hemos encontrado un comportamiento distinto.

En primer lugar mostramos los resultados obtenidos para $\mu = 0.2$ y $\mu = 0.4$:

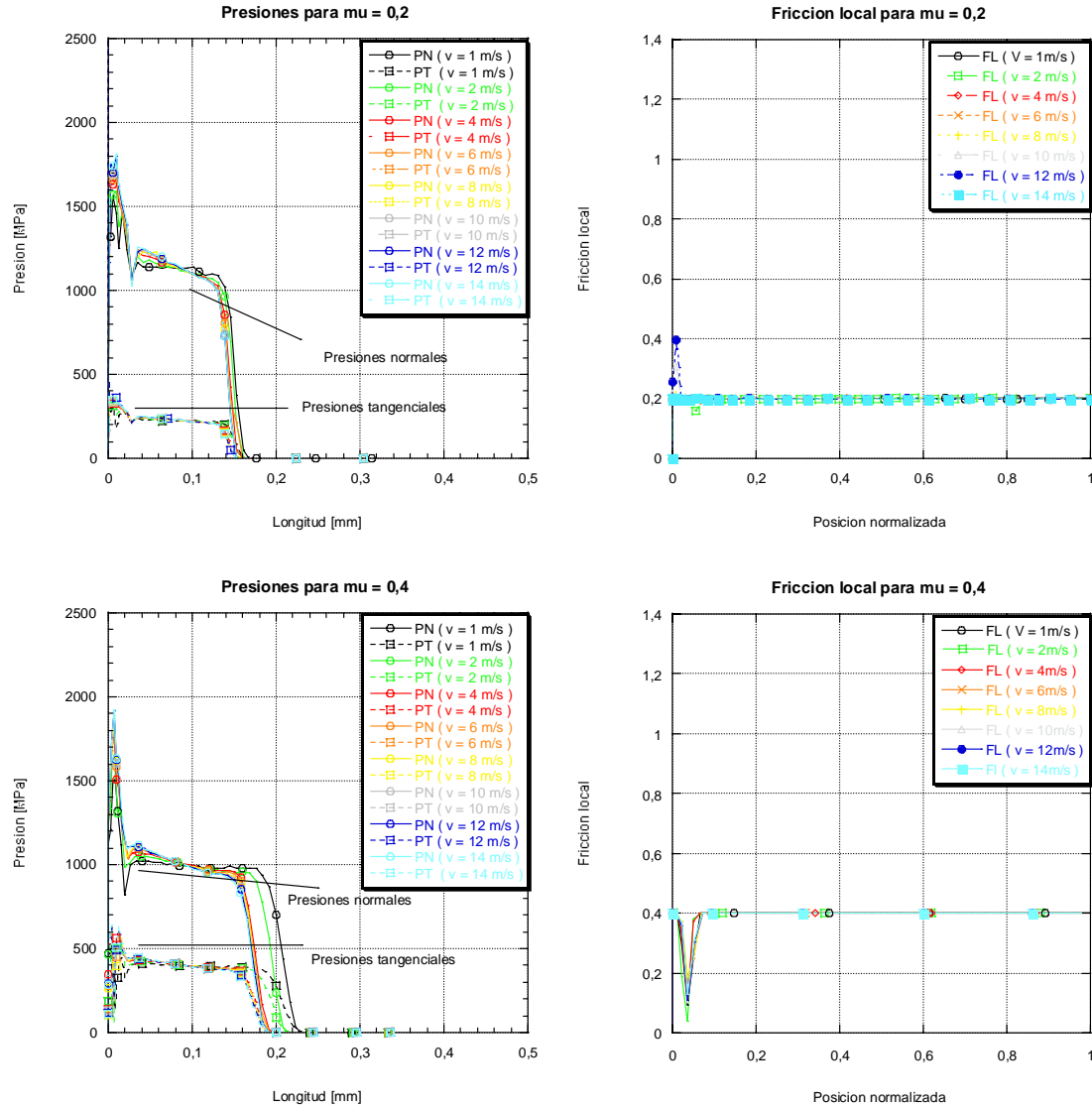


Fig. 18: Presiones y fricciones locales para $\mu = 0.2$ y $\mu = 0.4$ respectivamente.

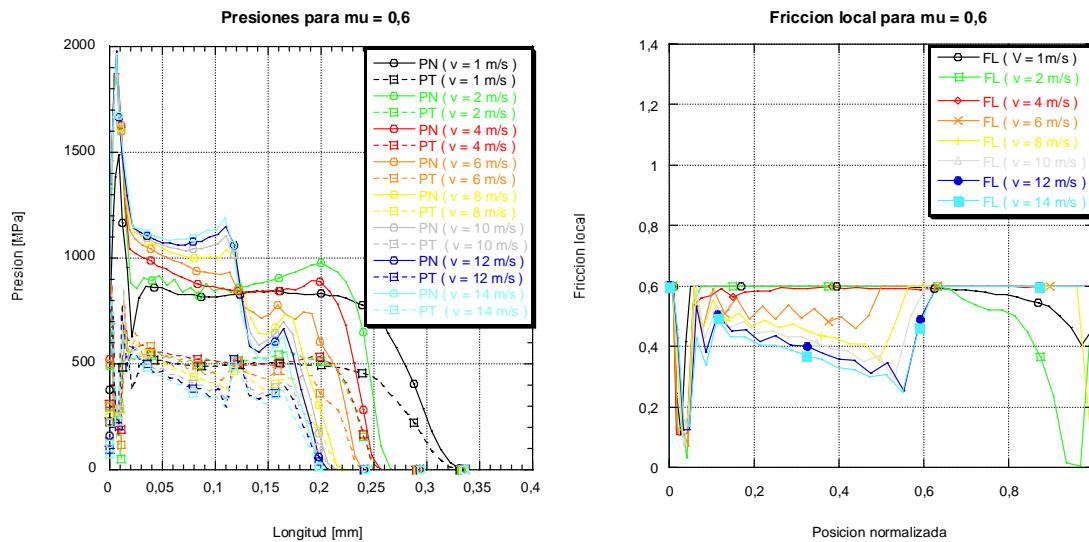
Para este primer grupo de fricciones implementadas ($\mu = 0.2$ y $\mu = 0.4$) las series que describen las presiones (tanto la normal como la tangencial) para cada una de las velocidades son muy similares. Se puede apreciar mínimamente como las presiones correspondientes a velocidades mayores son un poquito superiores. También se puede ver como a mayor velocidad, la longitud en la que caen al cero de presiones las series es menor, es decir habrá menor longitud de contacto.

En cuanto a la fricción local podemos ver como en ambos casos a lo largo de casi toda la longitud de contacto, el resultado es una recta de valor constante que coincide con el de la fricción implementada ($\mu = 0.2$ y $\mu = 0.4$ respectivamente). Solo existe una pequeña zona a lo

largo del contacto en la que la fricción local se desvía de la fricción implementada y esta se localiza en torno al radio de la herramienta, donde debido a que las distintas orientaciones de las presiones normales y tangenciales obtenemos distintos valores.

Ahora si comparamos las gráficas de las presiones entre si observaremos como para $\mu = 0.4$ obtenemos máximos de presiones más elevados, y además como en este caso la distancia media que existe entre las tangenciales y sus respectivas normales es menor, debido a que como hemos visto el cociente de estas dos magnitudes va a ser precisamente μ_{local} . La gráfica de presiones de $\mu = 0.4$ nos muestra también mayores longitudes de contacto y mayores distancias entre ellas.

Ahora pasamos a mostrar los resultados de presiones y fricciones locales de $\mu = 0.6$; $\mu = 0.8$ y $\mu = 1$, donde hemos detectamos diferencias importantes:



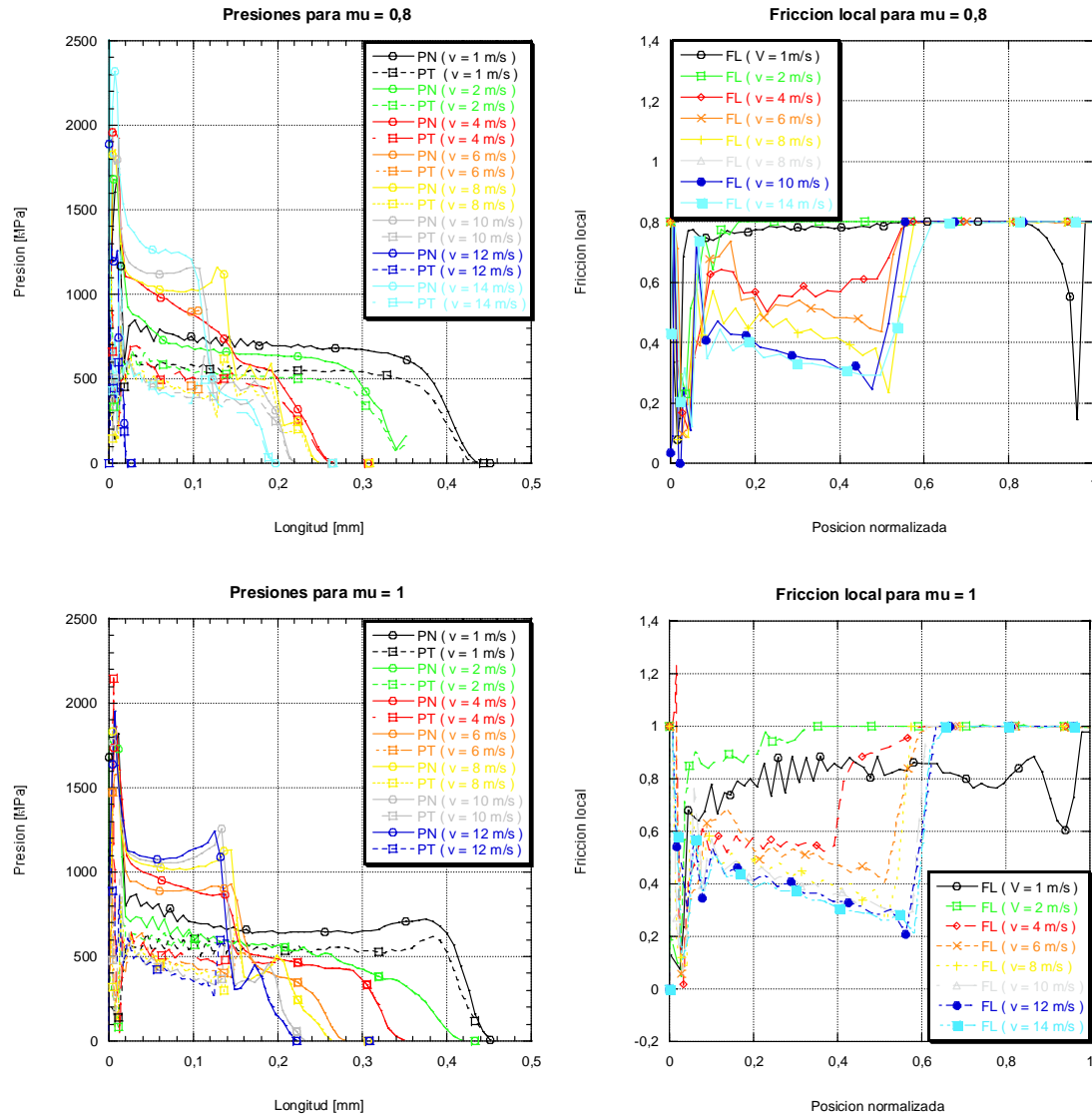


Fig. 19: Presiones y fricciones locales para $\mu = 0.6$; $\mu = 0.8$ y $\mu = 1$ respectivamente.

Para este segundo grupo de gráficas vemos como las componentes normales y tangenciales comienzan a confundirse producto de la mayor fricción implementada y además como ya no son tan iguales para todas las velocidades. Se observan series de presiones mucho menos homogéneas que en el primer grupo. Además tenemos mayores longitudes de contacto que en el primer grupo y máximos más elevados de presiones.

En cuanto a las fricciones locales vemos un hecho claramente diferenciador. Mientras que en el primer grupo obteníamos rectas casi constantes y del valor de la fricción implementada, aquí para la mayoría de las simulaciones el valor de la fricción local no alcanza la fricción implementada hasta aproximadamente el 60 % de la longitud de contacto. Hasta alcanzar este

valor las fricciones locales se mantienen por debajo y alejándose más de este valor cuanto mayor es la velocidad.

Este fenómeno de diferenciación de dos zonas a lo largo del contacto entre herramienta y viruta es conocido como *sticking-sliding* y se produce una combinación de temperaturas suficientemente altas en la interfase (aproximadamente dos tercios mayores que la temperatura de fusión del material) con presiones muy elevadas. El *sticking-sliding* se puede representar mediante la siguiente ecuación:

$$\tau = \min. (\mu\sigma; \tau_{\text{material}}) \quad (10)$$

En la primera zona (*sticking*) el esfuerzo cortante en lugar de ser el producto de $\mu\sigma$, es igual a τ_{material} (la tensión equivalente en cizalladura máxima que puede aguantar el material) debido a las altas temperaturas. El hecho de que τ disminuya tomando el valor de τ_{material} hace que la fricción local también decrezca en esta primera zona y se alcancen valores inferiores al de la fricción implementada. En la zona del *sliding*, en la que las presiones no son tan altas, el valor de σ ya no es tan alto y hace que el producto de $\mu\sigma$ sea menor a τ_{material} . Por tanto en esta zona como ocurre de *sliding* $\tau = \mu\sigma$.

Este modelo de fricción es el que representamos a continuación con el siguiente dibujo:

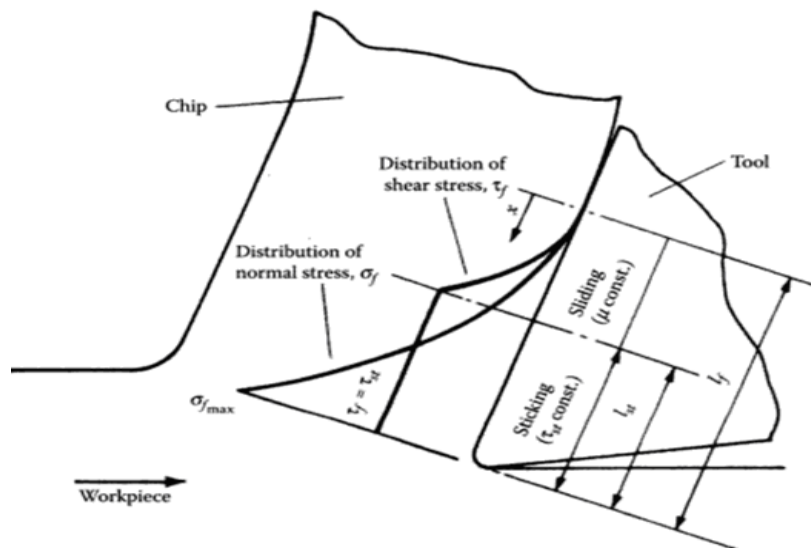


Fig. 20. Modelo de la fricción viruta-herramienta en el corte ortogonal.

Este modelo, conocido como el modelo de Zorev, supone que en el punto donde finaliza el contacto entre viruta y herramienta tanto las tensiones normales como la tangenciales son igual a cero, y de aquí en adelante las tensiones normales crecen exponencialmente. En la región en que se produce el *sliding* la tensión tangencial crece acorde a la ley de Coulomb, mientras que cuando nos encontramos ante la zona de *sticking* la tensión tangencial se convierte en una constante igual a la tensión límite de cizalladura del material de la pieza.

En resumen, parece ser que el hecho de obtener mayores temperaturas y presiones en las simulaciones con mayor coeficiente de fricción implementado hace que hasta $\mu = 0.4$ solo observemos una zona de *sliding* y partir de aquí en adelante ($\mu = 0.6$; $\mu = 0.8$ y $\mu = 1$) se empiece a manifestar el *sticking* (manifestándose más llamativamente cuando mayor sea la temperatura (presuponemos que a mayor velocidad)). El *sticking* tiene lugar en la zona inicial del contacto y hace que viruta y herramienta se peguen.

5.b.iii. Análisis de las velocidades de la viruta:

Hemos realizado un análisis de cómo son las presiones a lo largo del contacto de la viruta con la herramienta. Vamos a intentar enlazar algunas de las conclusiones extraídas para explicar los resultados obtenidos del análisis de la velocidad absoluta de la viruta en el contacto.

Como hemos hecho en el anterior apartado, dividiremos nuestras simulaciones entre aquellas en las que solo observamos *sliding* ($\mu = 0.2$ y $\mu = 0.4$) y aquellas en las que observamos *sticking* y *sliding* (el resto).

En primer lugar mostramos y analizamos los resultados del primer grupo:

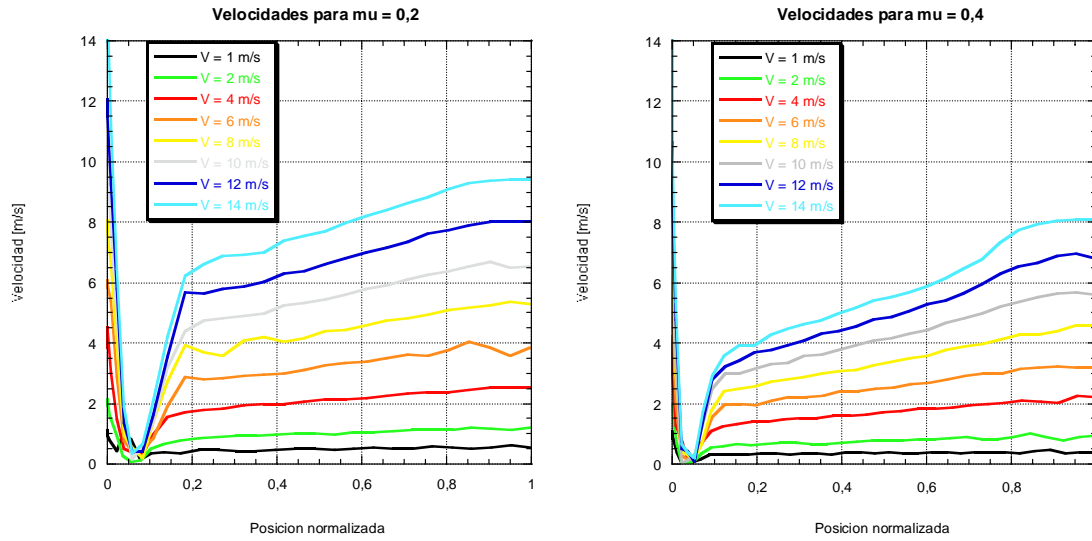
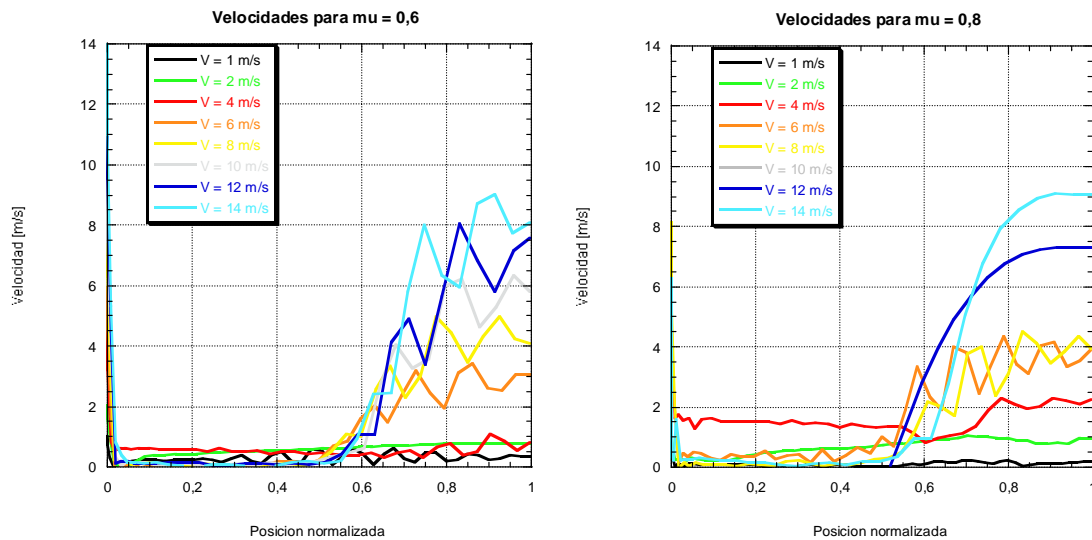


Fig. 21. Velocidades para $\mu = 0.2$ y $\mu = 0.4$ respectivamente.

Para las simulaciones con bajos coeficientes de fricción implementados ($\mu = 0.2$ y $\mu = 0.4$), como hemos visto con anterioridad no tenemos sticking, sino únicamente sliding. En estas dos gráficas se observa como se produce un deslizamiento entre la viruta y la herramienta. La velocidad de la viruta va creciendo de forma lineal a medida que nos movemos en la interfase entre la viruta y la herramienta.



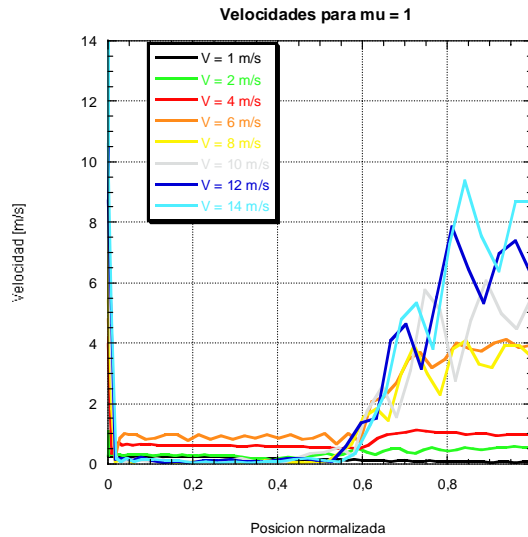


Fig. 22. Velocidades para $\mu = 0.6$; $\mu = 0.8$ y $\mu = 1$.

Sin embargo para el resto de coeficientes de fricción implementados ($\mu = 0.6$, $\mu = 0.8$ y $\mu = 1$) se observa como existe una zona inicial en la que la velocidad de la viruta es muy cercana a cero, la viruta parece pegarse a la herramienta (*sticking*).

Posteriormente, en una zona cercana al 60 % de la distancia de contacto normalizada (análogamente a como veíamos en las fricciones locales) la velocidad de la viruta comienza a crecer de forma irregular (ya nos encontramos en *sliding*).

Este fenómeno de *pegamiento de la viruta (sticking)* es el que ocasiona vibraciones entre la herramienta y la pieza que se manifiestan en las fuertes variaciones de las fuerzas, que sufren ciclos más o menos constantes.

5.b.iv. Análisis de temperaturas:

La gran importancia que tiene el estudio de las temperaturas en el mecanizado radica fundamentalmente en el hecho de que las altas temperaturas afectan considerablemente a las propiedades de la herramienta y a su desgaste y como consecuencia tienen una gran influencia en la economía de las operaciones de corte de metales y en su acabado.

Casi toda la energía del corte se disipa en forma de calor, este calor es el que provoca las altas temperaturas en la interfase entre la viruta y la herramienta.

En primer lugar hemos generado una serie de gráficas en las que se ve la evolución de las temperaturas a lo largo de los elementos del path, desde la zona de curvatura del radio de la herramienta en la parte inferior, hasta la zona superior del contacto.

Hemos normalizado el recorrido de contacto (variable del eje de abscisas) dividiéndola entre la longitud de contacto de forma que esta variable nos muestra de forma porcentual en que zona del contacto nos encontramos. De ahí que sea una variable que mostramos sin unidades, ya que es adimensional. De esta forma podremos evaluar todas las evoluciones de temperaturas en un intervalo común de posición normalizada, de 0 a 1.

Análisis de temperaturas en función de la velocidad de corte:

En primer lugar vamos a mostrar una comparativa de las temperaturas con respecto a la velocidad, es decir vamos a representar para cada uno de los coeficientes de fricción una gráfica en la que se muestran las temperaturas correspondientes a cada una de las velocidades.

Como podemos ver en estas cinco gráficas **a medida que aumentamos la velocidad del mecanizado para cada una de las fricciones implementadas, las temperaturas que se alcanzan en la interfase van en aumento**. Este hecho es evidente ya que cuando aumentamos la velocidad crece la energía disipada, que se convierte en calor. Como es obvio cuanto mayor es la velocidad y por tanto el calor mayor serán las temperaturas resultantes en el la interfase entre la viruta y la herramienta.

Otro hecho que parece mostrarnos estas gráficas es que cuanto menor es la velocidad antes se alcanza la temperatura máxima (a menor distancia normalizada).

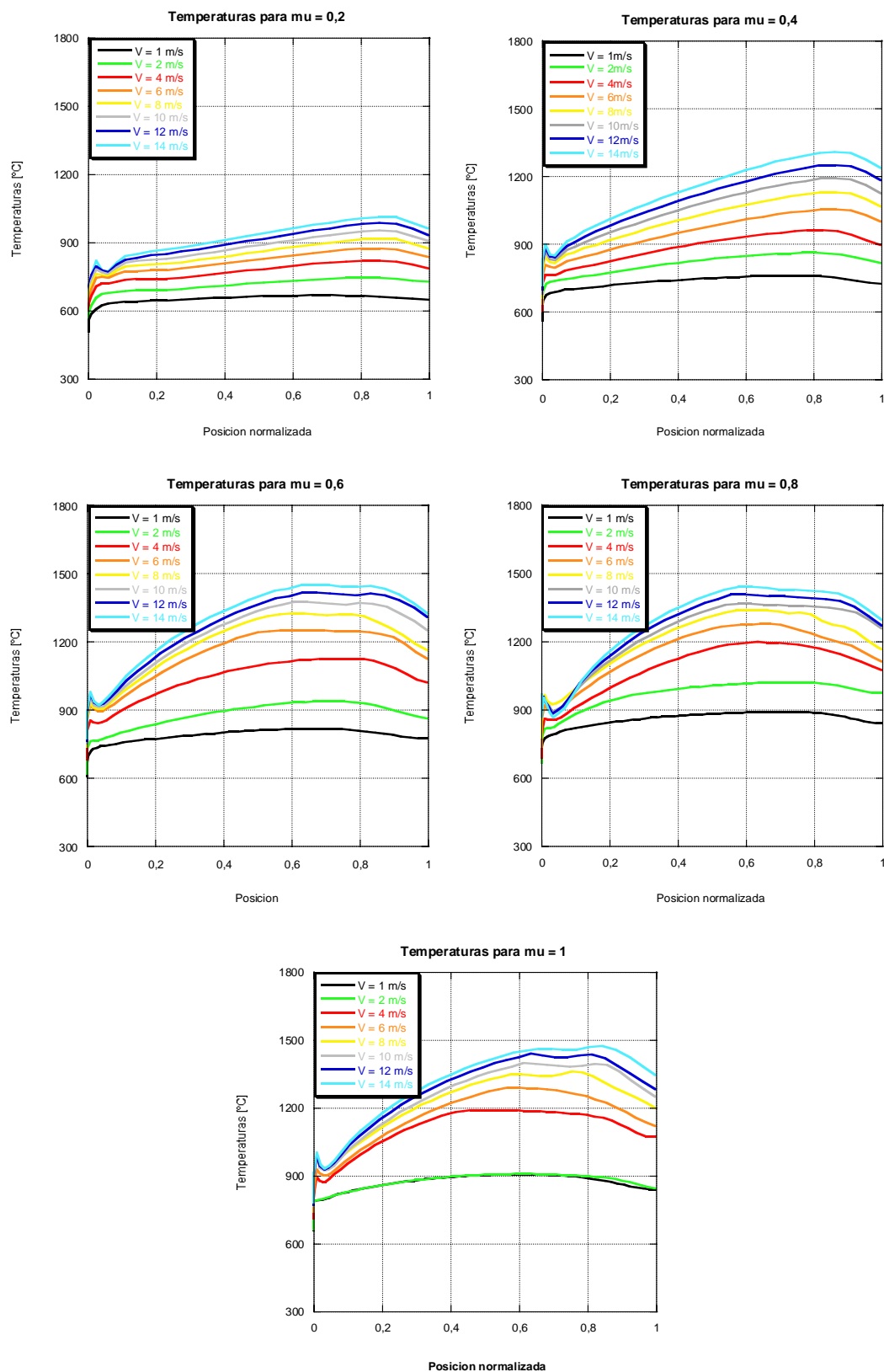


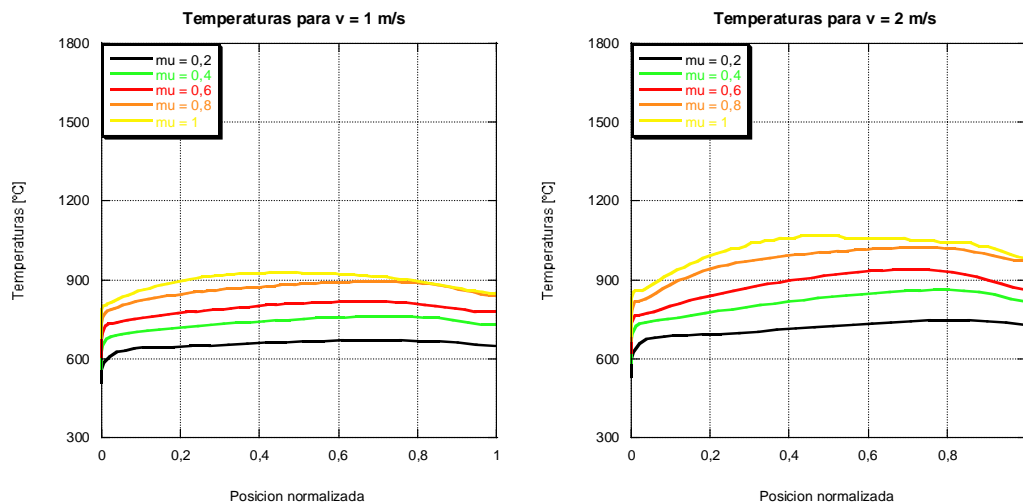
Fig. 23. Temperaturas obtenidas para una fricción constante, a diferentes velocidades de corte.

Análisis de temperaturas en función del coeficiente de fricción:

Ahora para cada una de las velocidades ensayadas vamos a mostrar una gráfica comparativa en la que mostramos las temperaturas para cada coeficiente de fricción.

De estas ocho gráficas lo primero que podemos concluir es que **a medida que aumentamos el coeficiente de fricción desde 0.2 hasta 1 las magnitudes de las temperaturas son cada vez mayores**, llegando casi a una temperatura máxima de 1500° K para el caso de $\mu = 1$. Se observan diferencias bastante notables entre las temperaturas de simulaciones de $\mu = 0.2$, $\mu = 0.4$, y el resto.

También podemos observar que para simulaciones con una velocidad por encima de 4 m/s las diferencias entre las temperaturas para las simulaciones de $\mu = 0.6$, $\mu = 0.8$ y $\mu = 1$ son mínimas.



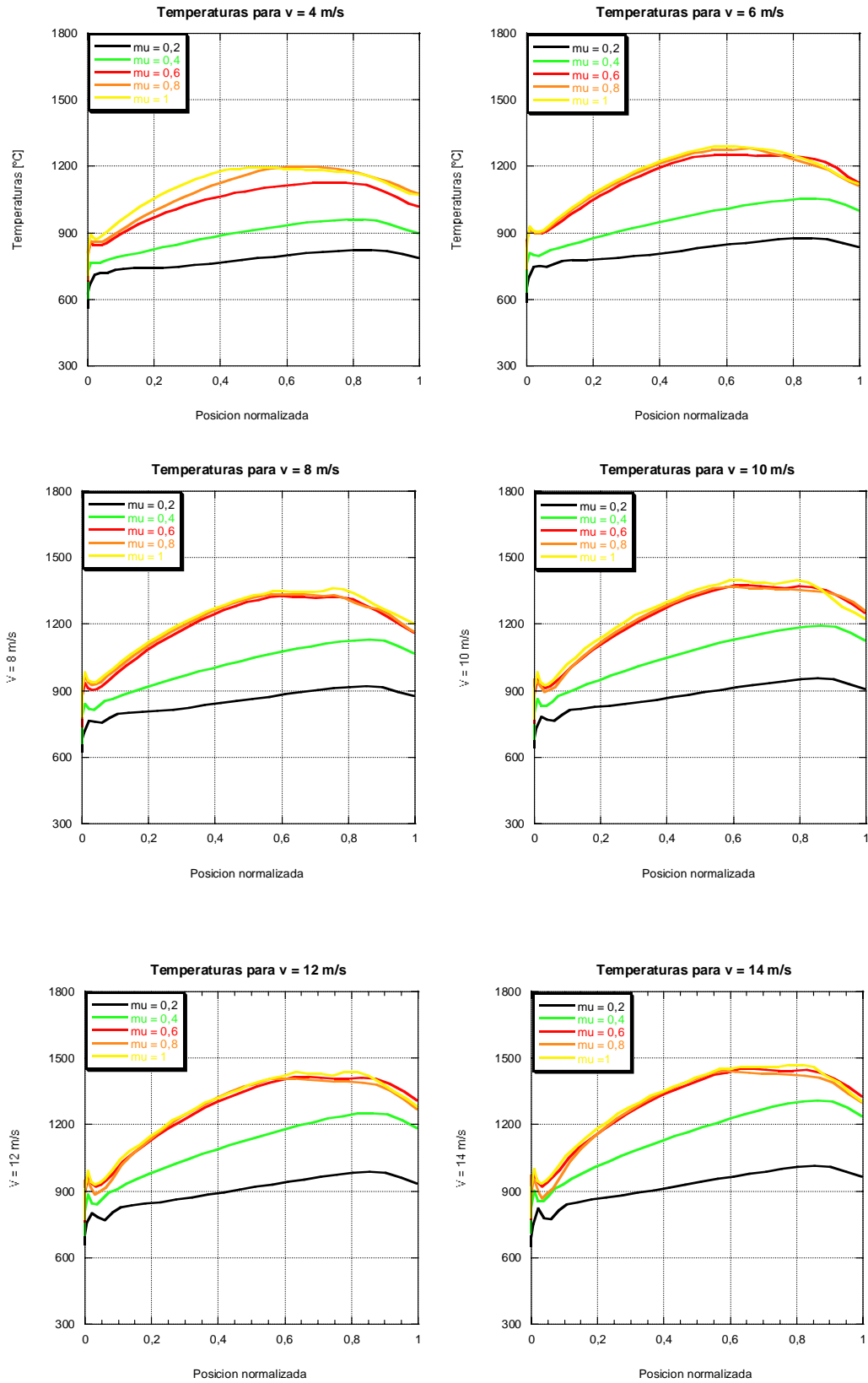


Fig. 24. Temperaturas obtenidas para una velocidad de corte constante, a diferentes fricciones.

Análisis de los campos de temperatura en la pieza y en la herramienta:

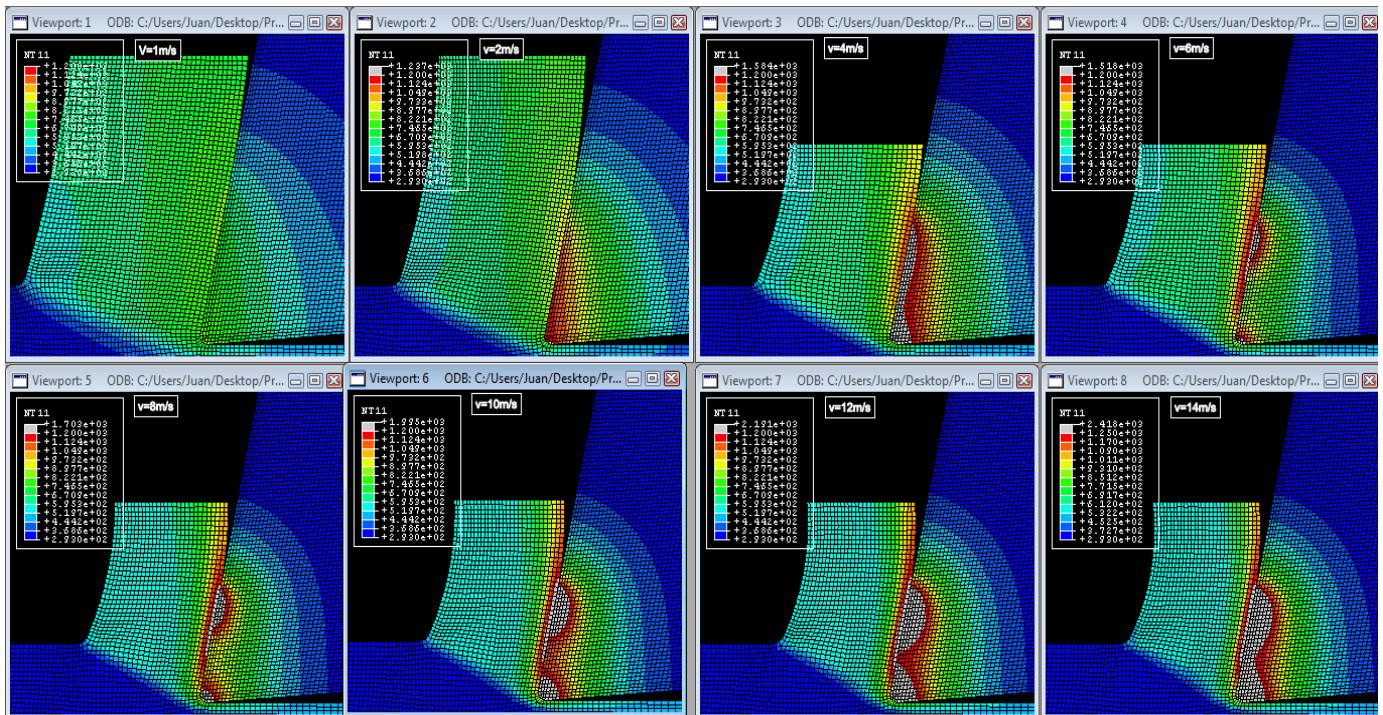
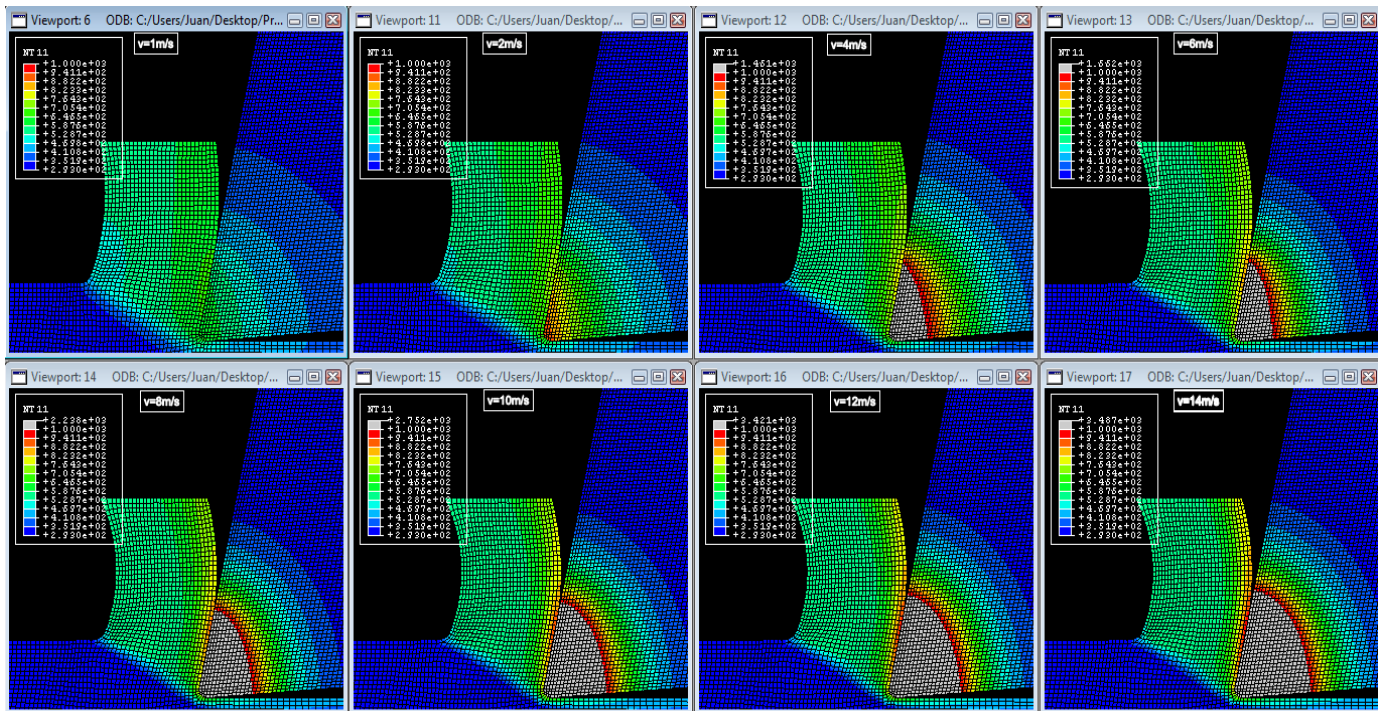
Otra forma de analizar los resultados de las temperaturas es analizar los campos de temperaturas no solo en el contacto herramienta-pieza sino de forma global en todos los elementos de la pieza y de la herramienta.

Para ello hemos dibujado, también para dos fricciones representativas de dos situaciones distintas (0.2 (*sliding*) y 0.6 (*sticking-sliding*)), los campos de temperatura que tenemos para todas y cada una de las velocidades a las que hemos analizado.

Para cada uno de las representaciones siguientes hemos mantenido un máximo de temperatura diferente en cada una de las fricciones para así poder apreciar mejor las variaciones de temperatura a medida que aumentamos la velocidad.

Representando las gráficas de esta forma también podemos ver de otra forma los resultados que hemos sacado con anterioridad acerca de como se van calentando más y más las zonas de contacto viruta-herramienta, a medida que aumentamos la velocidad para cada una de las fricciones implementadas.

También podemos ver el calentamiento de la herramienta, manifestado en una zona gris que a priori irá creciendo según aumentemos la velocidad. Esta zona gris de la herramienta será la zona que esté por encima del máximo fijado para cada una de las simulaciones. Sin embargo no podremos extraer datos muy concluyentes de los calentamientos de la herramienta, ya que los tiempos de las simulaciones son muy pequeños y no son todos iguales.



Llama la atención la distinta morfología que presenta el campo de temperaturas en la herramienta para el caso del *sticking-sliding*

Aquí también podemos observar diferencias entre la representación de $\mu = 0.2$ que representa un contacto en el que existe únicamente *sliding*, y la representación de $\mu = 0.6$ que representa un contacto en el que también existe *sticking* además del *sliding*. En esta última secuencia de imágenes se pueden observar dos zonas de calentamiento diferenciadas. Sin embargo no entraremos a analizar este hecho ya que queda fuera del alcance de nuestro proyecto puesto que estas zonas se manifiestan en la herramienta, cuyos campos de temperatura no analizaremos en análisis por la dificultad que requiere hacer simulaciones que alcancen campos de temperatura estables en las herramientas.

Máximos de temperatura y localización:

En la siguiente gráfica mostramos el valor máximo de la temperatura obtenido para cada una de las simulaciones (para cada $\mu_{implementado}$ y velocidad) y representamos la nube de puntos resultante.

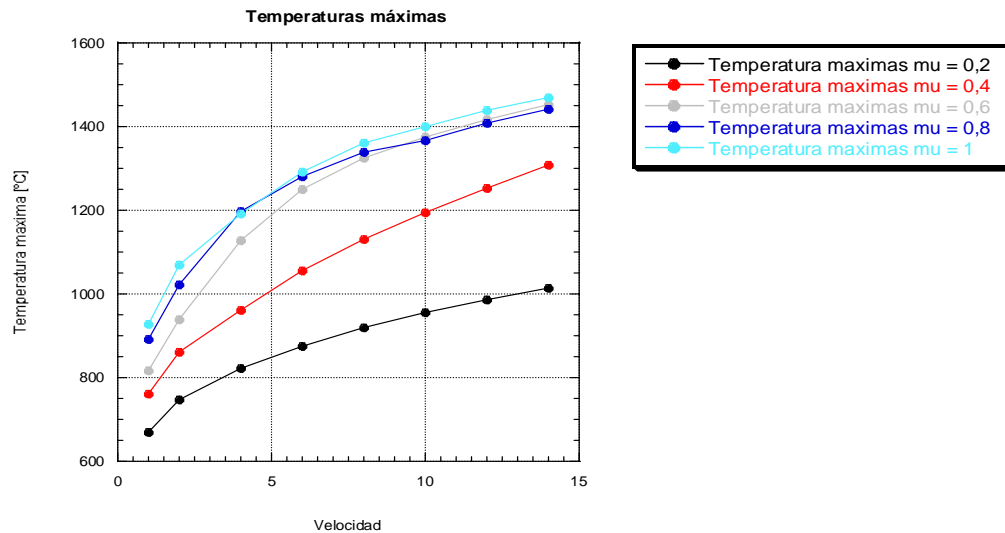


Fig. 27. Máximos de temperatura para cada simulación

Como cabía esperar y como podíamos haber observado en la gráfica la tendencia general que se observa es que cuanto mayor es la velocidad y mayor es el coeficiente de fricción, mayores

son las temperaturas máximas obtenidas en cada una de las simulaciones, aunque con alguna excepción.

Para finalizar con el análisis de los gráficos de temperatura, en la gráfica que se muestra a continuación, se representa cual es la situación de la zona más caliente del contacto virtual herramienta:

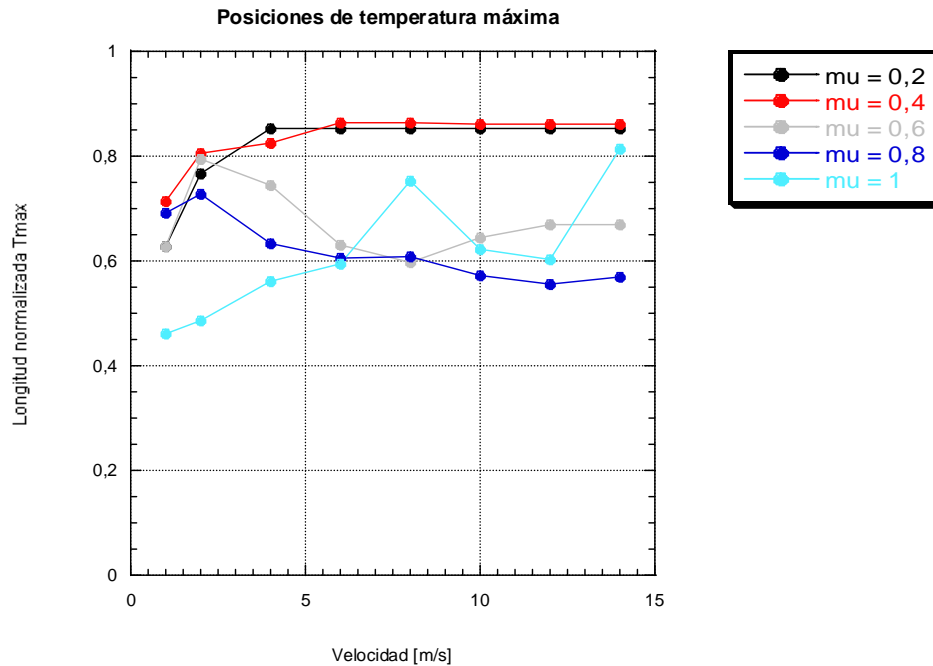


Fig. 28. Localización de los máximos de temperatura para cada simulación.

En esta gráfica podemos ver una vez más comportamientos distintos para las simulaciones implementadas de baja fricción ($\mu = 0.2$ y $\mu = 0.4$) y para el resto.

Para bajas fricciones podemos ver como el punto de máxima temperatura se va desplazando a lo largo del path desde alrededor de 0.7 de la distancia normalizada hasta alcanzar el 0.85 para velocidades iguales o mayores a $V = 6$ m/s. A partir de aquí la localización del máximo de temperatura se mantiene constante con respecto a la velocidad.

Para fricciones altas ($\mu = 0.6$, $\mu = 0.8$ y $\mu = 1$) no podemos extraer ninguna conclusión sobre la situación del máximo de temperatura, ya que nos encontramos ante una nube de puntos. Como hemos visto en el análisis de campos de temperaturas cuando existe *sticking* la morfología de los campos de temperaturas cambia.

5.b.v. Análisis de las longitudes de contacto:

El análisis de las longitudes de contacto entre la viruta y la herramienta es otro parámetro de gran importancia a estudiar, principalmente porque este contacto representa el medio a través del cual el calor fluye de la viruta a la herramienta. Por lo tanto la longitud de contacto será otra factor que en alguna medida influirá a las temperaturas, puesto que cuando mayor sea la longitud de contacto mayor será el calor transferido a la herramienta y mayores temperaturas cabe esperar en ella (para experimentos hechos a la misma velocidad).

El análisis de las longitudes de contacto podíamos haberlo considerado parte del estudio global ya que para representar esta magnitud no obtenemos una serie para cada una de las simulaciones, como el resto de variables analizadas en el análisis local sino una solo magnitud. Sin embargo lo hemos considerado parte del análisis local ya que para su cálculo ha sido necesario estudiar los datos locales de las presiones y ver en que momento estas se hacían cero. El contacto se producirá desde el punto inferior (A) hasta este punto donde las presiones se hacen cero (B).

Se han medido para el instante final de cálculo de cada simulación las longitudes del contacto herramienta-pieza, resultando la siguiente gráfica:

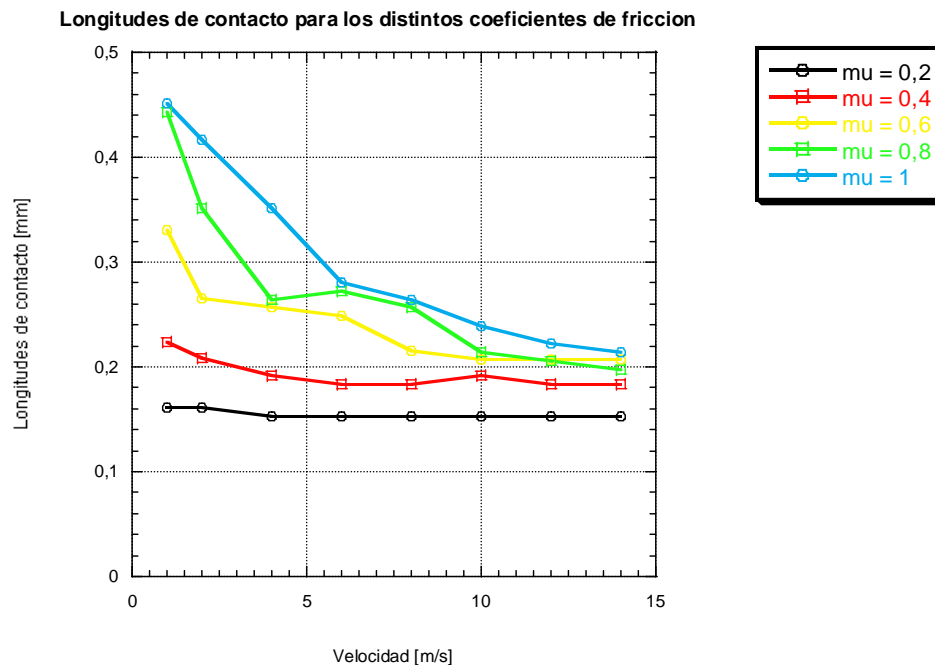


Fig. 29. Longitud del contacto viruta-herramienta para cada simulación.

En esta gráfica podemos ver como para cada coeficiente de fricción específico a medida que aumentamos la velocidad la distancia de contacto entre la viruta y la herramienta disminuye tendiendo a un valor constante para cada fricción. Cuanto mayor es el coeficiente de fricción mayor es la disminución que experimenta la longitud de contacto. Parece que a partir de cierta velocidad tendríamos valores de la longitud de contacto constantes.

Además comparando los casos con distinta fricción nos podemos dar cuenta de que para mayores coeficientes de fricción mayores son las longitudes de contacto.

Como hemos visto con antelación cuanto mayor es la velocidad menor es la longitud de contacto. Ambos parámetros influyen de manera contrapuesta para las temperaturas.

6. CONCLUSIONES.

Respecto a los análisis globales:

- Cuando menores son las velocidades y más altas son las fricciones implementadas mayores son las fuerzas tanto en las dirección X e Y, como las normales y las tangenciales.
- Respecto a las fricciones globales se observa como para las fricciones implementadas bajas ($\mu = 0,2$ y $\mu = 0,4$) tenemos unos resultados constantes independientemente de la velocidad. Sin embargo para las fricciones implementadas altas (el resto) los resultados obtenidos de las fricciones globales son muy dependientes de la velocidad, debido a que cuando aumentamos esta, el material se reblandece y sus propiedades cambian.

Respecto a los análisis locales:

- En cuanto a las presiones y las fricciones locales para bajas fricciones implementadas ($\mu = 0,2$ y $\mu = 0,4$) tenemos fricciones locales casi constantes y del valor de la fricción implementada (sliding), fruto de presiones (normales y tangenciales) muy homogéneas independientemente de la velocidad. Para el resto de fricciones implementadas las fricciones locales obtenidas no llegan a alcanzar el valor de la fricción implementada hasta el 60 % de la longitud de contacto normalizada (sticking) fruto de unas presiones tangenciales menos elevadas de lo cabría esperar provocadas por la combinación de altas temperaturas y presiones presentes.
- Respecto a las velocidades podemos ver que para las bajas fricciones implementadas tenemos un claro deslizamiento entre la viruta y la herramienta (sliding), mientras que para el resto de fricciones implementadas tenemos una zona inicial (hasta el 60 %) en la que la velocidad de la viruta es muy cercana a cero, parece que la viruta se pega a la herramienta (sticking). Pasada esta zona inicial la velocidad aumenta hasta alcanzar valores parecidos a los que se alcanzan en simulaciones que solo se observa sliding.
- Respecto a las temperaturas podemos observar los siguientes cosas:

- A medida que aumentamos la velocidad del mecanizado para cada una de las fricciones implementadas, las temperaturas que se alcanzan en la interfase van en aumento.
- A medida que aumentamos el coeficiente de fricción para cada una de las velocidades las temperaturas que se alcanzan en la interfase son cada vez mayores.
- Respecto a los campos de temperatura que se alcanzan en la viruta y la herramienta podemos observar dos distintas morfologías dependiendo de si nos encontramos en sliding o en sticking-sliding.
- En cuanto a los máximos de temperatura de cada una de las simulaciones podemos decir que cuanto mayor es la velocidad y el coeficiente de fricción implementado mayores es el valor del máximo de temperatura que vamos a encontrar. En cuanto a la localización de estos máximos de temperatura podemos decir que para las bajas fricciones implementadas estos máximos se sitúan entre el 65 % de la longitud de contacto normalizada (para bajas velocidades) y se van desplazando hasta alcanzar el 85 % de la longitud de contacto normalizada para altas velocidades. Para las altas fricciones implementadas no podemos sacar ningún resultado concluyente de la localización de estos máximos de temperatura.
- Respecto a las longitudes de contacto cuanto mayor es la velocidad y menor es la fricción implementada menores son las longitudes de contacto obtenidas.

El MEF constituye efectivamente una aproximación razonablemente buena desde el punto de vista cualitativo, hemos comprobado que se siguen las tendencias que marca la teoría general del corte ortogonal.

Cuantitativamente no podemos pronunciarnos ya que deberíamos tener ensayos experimentales con los mismos parámetros de corte, herramienta, material a mecanizar... lo cual queda fuera del alcance este proyecto por su gran dificultad.

Otra de las conclusiones que podemos sacar cuando realizamos estudios de procesos de mecanizado mediante el MEF es que el primer y uno de los más importantes problemas con el que nos encontramos es ¿Cómo será la forma de la viruta producida?

También hemos observado es que cuando mayor es la fricción implementada mayor es la dificultad de la predicción que hacemos con el uso del MEF. A mayores fricciones se producen mayores presiones y temperaturas y como consecuencia de esto aparece el fenómeno del *sticking* en las simulaciones

Además el estudio de las simulaciones se complica cuando tenemos grandes temperaturas ya tenemos que considerar variaciones en las propiedades térmicas del material lo que complica mucho el proceso.

Para las simulaciones de coeficientes de fricción bajos ($\mu = 0.2$ y $\mu = 0.4$) obtenemos resultados bastante acordes con lo que cabría esperar mientras que para los coeficientes de fricción más altos tenemos problemas cuando implementamos la simulación con una velocidad demasiado grande.

7. FUTUROS TRABAJOS

Existe mucho trabajo que hacer aún en este campo, son multitud las variables de input que se pueden variar para ver los efectos que producen en la variables output. Nosotros solo hemos estudiado la influencia de la velocidad del mecanizado y el coeficiente de fricción, pero hay muchos otros parámetros cuya influencia sería interesante estudiar.

Se podría investigar la influencia que tienen el radio de la herramienta, los ángulos de desprendimiento, incidencia o filo, la profundidad de pasada, nuevos materiales en la herramienta de mejores características...

En mi opinión sería interesante implementar las simulaciones con tiempos de simulación mucho más grandes y ver de este modo algo muy importante como son las TEMPERATURAS en estado estacionario de la herramienta. En este proyecto no se han podido extraer conclusiones acerca de este tema. Esta variable nos serviría para poder extraer conclusiones sobre la durabilidad de las herramientas, factor crítico en el mecanizado, ya que está comprobado que el desgaste de las herramientas está muy relacionado con las temperaturas en la interfase.

8. ÍNDICE DE FIGURAS.

Fig.1: Esquema del proceso de torneado.

Fig.2: Esquema de fresado en discordancia y en concordancia.

Fig.3: Esquema de taladrado.

Fig.4: Esquema de un proceso de corte ortogonal.

Fig.5: Principales parámetros en el corte ortogonal.

Fig.6: Descomposición de R y R' .

Fig.7: Círculo de Merchant.

Fig.8: Cinemática del corte ortogonal.

Fig.9: Esquema de zonas primaria, secundaria y terciaria.

Fig.10: Geometría del modelo.

Fig.11: Mallado del modelo.

Fig.12: Tipologías de estacionalidad de las fuerzas.

Fig.13: Campos de temperaturas en $t=0$; 0,25; 0,50; 0,1; 0,15; y 2 ms

Fig.14: Fuerzas en la dirección X e Y globales.

Fig 15: Fuerzas normales y tangenciales globales.

Fig. 16: Coeficientes de fricción global.

Fig. 17: Puntos de inicio y fin de la interfase viruta herramienta (A y B).

Fig. 18: Presiones y fricciones locales para $\mu = 0.2$ y $\mu = 0.4$ respectivamente.

Fig. 19: Presiones y fricciones locales para $\mu = 0.6$; $\mu = 0.8$ y $\mu = 1$ respectivamente.

Fig. 21. Velocidades para $\mu = 0.2$ y $\mu = 0.4$.

Fig. 22. Velocidades para $\mu = 0.6$; $\mu = 0.8$ y $\mu = 1$.

Fig. 23. Temperaturas para $\mu = 0.2$; $\mu = 0.4$; $\mu = 0.6$; $\mu = 0.8$ y $\mu = 1$.

Fig. 23. Temperaturas para $v = 1$; $v = 2$; $v = 4$; $v = 6$; $v = 8$; $v = 10$; $v = 12$ y $v = 14$.

Fig. 23. Campos de temperaturas para $\mu = 0, 2$. *Sliding*.

Fig. 26. Campos de temperaturas para $\mu = 0, 6$. *Sticking-Sliding*.

Fig. 27. Máximos de temperatura para cada simulación.

Fig. 28. Localización de los máximos de temperatura para cada simulación.

Fig. 29. Longitud del contacto viruta-herramienta para cada simulación.

9. BIBLIOGRAFÍA

Trent.E.M., “Metal Cutting, 2nd ed., Butterworths”,
London, 1984.

Shaw, M.C., “Metal Cutting Principles”, Oxford University
Press, London, 1984.

Stephenson, D.A., “Tool-Work Thermocouple Temperature
Measurement” Trans. ASME. J. Eng. Ind. 115, pp.432-
437, 1993.

Merchant, M.E. and Field, M., “Mechanics of Formation
of the Discontinuous Chip in Metal Cutting”, Trans ASME
71, pp.4-21, 1949.

Zorev, N. N., Interrelationship Between Shear Process Occuring Along
Tool Face and Shear Plane in Metal Cutting, American Society of
Mechanical Engineers, 1963.

APUNTES TECNOLOGÍA MECÁNICA UC3M

Astakhov, Viktor P. Tribology of metal cutting

Ernst, H., “Machining of Metals”, American Society for Metals, 1938.

Zorev, N. N., “Interrelationship Between Shear Process Occuring Along
Tool Face and Shear Plane in Metal Cutting”, American Society of
Mechanical Engineers, 1963.

Kalpakkian, Serowe, “Manufacturing Engineering and technology”, Prentice Hall, 2000

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA TODOS

"Apuntes de Conformado de Materiales"

FI-UNAM

México, 1995

DOYLE y KEYSER

TODOS

"Procesos y Materiales de Manufactura para Ingenieros"

Prentice-Hall

México, 1988

SHARER H.

TODOS

"Ingeniería de Manufactura"

CECSA

México, 1991

Artículo Modelling **the effects of tool-edge radius on residual stresses when orthogonal cutting** AISI 316L by Mohamed N.A. Nasr

10. AGRADECIMIENTOS:

A mis padres Juan Jesús y Adela por su apoyo incondicional y generosidad y a mi tutor Rachid por su paciencia y ayuda.